

عاهد الخطيب

مبادئ تحويل الطاقة



الشرق

عاهد الخطيب

مبادئ تحويل الطاقة

النَّاشِر: دَارُ الشُّرُوقِ لِلنَّشْرِ وَالتَّوْزِيعِ
عَمَّان - الْأُرْدُن

* عاهد علي الخطيب، مبادئ تحويل الطاقة

* الطبعة الأولى ١٩٨٩م

* جميع الحقوق محفوظة

* الناشر : دار الشروق للنشر والتوزيع

ص.ب ٩٢٦٤٦٣ — هاتف ٦٢٤٣٢١

تلکس ٢٣٥٥٧ يونيو

عمّان — الأردن

* التوزيع: المركز العربي لتوزيع المطبوعات

ص.ب ١٣/٥٦٨٧ — تلفون ٨٠٣٥٣٧

تلکس ٢٠٩٨٣ أسيب

بيروت — لبنان

المقدمة

بسم الله الرحمن الرحيم

يأتي هذا الجهد المتواضع في إطار محاولة لإيجاد مراجع باللغة العربية لطلبة الجامعات وكليات المجتمع والمعاهد في الدول العربية والتي تفتقر إلى مثل هذه المراجع في مختلف المواضيع العلمية .

روعي في إعداد مادة هذا الكتاب البساطة والوضوح مع التركيز على المبادئ الأساسية لتحويل الطاقة ، ولزيادة الإيضاح حُرس على حل بعض الأمثلة المساعدة حيثما لزم ذلك .

وقد افترض توافر خلفية علمية لدى الدارس لهذا الكتاب في مواضيع الديناميكا الحرارية وتوليد البخار ومحركات الاحتراق الداخلي ومبادئ الهندسة الكهربائية لكي يتمكن من متابعة موضوع هذا الكتاب وتحقيق الفائدة المرجوة .

صُنِفَت مادة هذا الكتاب في ثمانية فصول ، تناول الفصل الأول حاجة الإنسان المتنامية للطاقة وأثر الطاقة في تطور المدنية الإنسانية منذ القدم ، ومصادر الطاقة المختلفة من مصادر تقليدية غير متجددة كوقود المستحاثات ومصادر متجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر .

تعرّض الفصل الثاني لمبادئ تحويل الطاقة والقوانين التي تحكم عمليات التحويل خصوصاً القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية مع مقارنة الكفاءات النظرية والعملية لعمليات تحويل الطاقة المختلفة .

تعرّض الفصل الثالث للطرق المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الحرارية مع التركيز على أهمية الاحتراق – ووقود هذا الاحتراق – في هذا المجال ، واختتم الفصل باستعراض وافٍ للحسابات الشمسية المختلفة وأهمية الطاقة الشمسية كمصدر رئيس من مصادر الطاقة الحرارية والتطبيقات العملية المختلفة للطاقة الحرارية من الشمس .

تعرّض الفصل الرابع للأنظمة المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الحرارية كمحركات دورة رانكن — خصوصاً التوربينات البخارية — والمحركات العاملة على الغاز — محرك ستيرلنغ والتوربين الغازي — وإنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الكيميائية كمحرك الاحتراق الداخلي ومضخة همفري ، وأخيراً إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة المائية باستخدام التوربينات المائية المختلفة .

استعرض الفصل الخامس أكثر الطرق شيوعاً في إنتاج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر كال توليد الكيميائي والتوليد الكهروضوئي والتوليد باستخدام طاقة الرياح .

تحدّث الفصل السادس عن الطرق الرئيسة المتّبعة في تخزين الطاقة بأشكالها المختلفة وأهمية هذا التخزين في التطبيقات العملية .

خُصّص الفصل السابع للحديث عن أهمية وفوائد ترشيد استهلاك الطاقة والسبل المختلفة التي يمكن اتباعها لترشيد هذا الاستهلاك في مختلف قطاعات الاستهلاك على المستويين الفردي والجماعي أو الحكومي .

أما الفصل الثامن والأخير فقد استعرض التلوّث البيئي الناتج عن عمليات تحويل الطاقة وأهم الطرق والأجهزة المستخدمة للتخفيف من حدّة هذا التلوّث .

في النهاية أمل أن أكون قد وفّقت في توفير مادة مفيدة لمدرّسينا وطلّبتنا الأعزاء راجياً من الله العون والتوفيق .

المؤلف

١٨ شباط ١٩٨٩م

١١ رجب ١٤٠٩هـ

المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدمة.....	٥
الفصل الأول : مقدمة عامة :	
١ - ١ التطور التاريخي لاستخدام الطاقة	١٣
٢ - ١ معدلات النمو في استهلاك الطاقة	١٧
٣ - ١ زيادة الطلب على الطاقة — تأثير التزايد السكاني والتطور التكنولوجي —	٢٥
٤ - ١ أزمات الطاقة — أبعادها وأسبابها والحلول المناسبة —	٣١
٥ - ١ طبيعة الطاقة	٣٤
١ - ٥ - ١ الشغل والطاقة	٣٤
٢ - ٥ - ١ الطاقة والقدرة ووحدات القياس	٣٤
٣ - ٥ - ١ أشكال الطاقة	٣٥
٦ - ١ مصادر الطاقة	٤٠
١ - ٦ - ١ مقدمة	٤٠
٢ - ٦ - ١ وقود المستحاثات	٤١
٣ - ٦ - ١ الطاقة الجيوفيزيائية	٥٥
٤ - ٦ - ١ الطاقة الحرارية الجوفية	٥٨
٥ - ٦ - ١ الطاقة النووية	٥٩
٦ - ٦ - ١ طاقة المد والجزر	٦٣

الفصل الثاني : مبادئ تحويل الطاقة :

١ - ٢ اعتبارات عامة في تحويل الطاقة	٧١
---	----

٧٣	٢ - ٢	مبدأ حفظ الطاقة — القانون الأول في التيرموديناميك —
٧٥	٢ - ٢ - ١	تطبيقات على القانون الأول
٧٩	٢ - ٢ - ٢	الطاقة الداخلية
٨٦	٣ - ٢	القانون الثاني في التيرموديناميك
٨٧	٢ - ٣ - ١	دورة كارنوت
٨٩	٢ - ٣ - ٢	المحرك الحراري
٩١	٢ - ٣ - ٣	مخططات الأنثروبيا
٩٣	٢ - ٣ - ٤	الثلاجة — دورة التبريد — والمضخة الحرارية
٩٧	٢ - ٤	العوائق العملية في تحويل الطاقة
٩٩	٢ - ٥	اعتبارات عملية في اختيار محولات الطاقة

الفصل الثالث : إنتاج الطاقة الحرارية :

١٠٣	٢ - ١	مقدمة الفصل الثالث
١٠٤	٢ - ٢	الاحتراق
١٠٤	٣ - ٢ - ١	وقود الاحتراق — المواد الهيدروكربونية التركيبية —
١٠٦	٣ - ٢ - ٢	الوقود المعيارى
١٠٨	٣ - ٢ - ٣	فيزياء الاحتراق وتفاعلاته
١١٠	٣ - ٢ - ٤	تفاعل الاحتراق الكيميائي والقيم الحرارية
١١٢	٣ - ٢ - ٥	القيمة النظرية لنسبة الهواء / الوقود
١١٧	٣ - ٢ - ٦	القيمة العملية لنسبة الهواء / الوقود
١١٨	٣ - ٢ - ٧	مبادئ حارقات الفحم الحجري
١٢٣	٣ - ٢ - ٨	أنظمة حرق الوقود الزيتي
١٢٦	٣ - ٢ - ٩	أنظمة حرق الوقود الغازي
١٢٩	٣ - ٢	الطاقة الحرارية من الشمس
١٢٩	٣ - ٢ - ١	مقدمة
١٣٠	٣ - ٢ - ٢	الأوقات الشمسية
١٣٤	٣ - ٢ - ٣	الزوايا الشمسية
١٣٦	٣ - ٢ - ٤	قيم الإشعاع الشمسي
١٤٥	٣ - ٤	التطبيقات العملية للطاقة الحرارية من الشمس

الفصل الرابع : إنتاج الطاقة الميكانيكية :

١٥١	٤ - ١ تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية
١٥١	٤ - ١ - ١ محركات دورة رانكن
١٦٤	٤ - ١ - ٢ المحركات العاملة على الغاز
١٧٩	٤ - ٢ تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية
١٧٩	٤ - ٢ - ١ محرك الاحتراق الداخلي
١٩٦	٤ - ٢ - ٢ مضخة همفري
٢٠٠	٤ - ٣ التوربينات المائية

الفصل الخامس : إنتاج الطاقة الكهربائية :

٢٠٧	٥ - ١ مقدمة الفصل الخامس
٢٠٨	٥ - ٢ مبدأ عمل المولد الكهربائي — المنوبة —
٢١٧	٥ - ٣ الطرق المباشرة لتوليد الطاقة الكيميائية
٢١٧	٥ - ٣ - ١ التوليد الكيميائي
٢٢١	٥ - ٣ - ٢ التوليد الكهروضوئي
٢٢٩	٥ - ٣ - ٣ التوليد باستخدام طاقة الرياح

الفصل السادس : تخزين الطاقة :

٢٣٩	٦ - ١ مقدمة الفصل السادس
٢٤١	٦ - ٢ تخزين الطاقة الميكانيكية
٢٤١	٦ - ٢ - ١ تخزين طاقة الحركة
٢٤٢	٦ - ٢ - ٢ تخزين طاقة الوضع
٢٤٧	٦ - ٣ تخزين الطاقة الكيميائية
٢٥٠	٦ - ٤ تخزين الطاقة الكهربائية
٢٥٧	٦ - ٥ تخزين الطاقة الحرارية

الفصل السابع : ترشيد استهلاك الطاقة :

٢٦٣	٧ - ١ فوائد وأهمية ترشيد استهلاك الطاقة
٢٦٥	٧ - ٢ حفظ الطاقة وتأثير العامل الشخصي
٢٦٧	٧ - ٣ الطلب على الطاقة والتزود بها في المستقبل
٢٦٨	٧ - ٤ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاعات الاستهلاك المختلفة

٢٦٨	٧ - ٤ - ١ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاعين المنزلي والتجاري
٢٧٠	٧ - ٤ - ٢ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي
٢٧٢	٧ - ٤ - ٣ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل

الفصل الثامن: التلوث البيئي الناتج عن تحويل الطاقة:

٢٧٧	٨ - ١ تغيرات المناخ
٢٧٧	٨ - ١ - ١ مناخ المدن
٢٧٨	٨ - ١ - ٢ الأمطار الحامضية
٢٨٠	٨ - ٢ تلوث الهواء
٢٨٠	٨ - ٢ - ١ الملوثات الأولية للهواء الجوي
٢٨٢	٨ - ٢ - ٢ تلوث الهواء الثانوي
٢٨٥	٨ - ٢ - ٣ التلوث داخل البيوت
٢٨٨	٨ - ٣ التحكم في تلوث الهواء وضبطه
٢٨٨	٨ - ٣ - ١ التحكم في الدقائق الصلبة العالقة
٢٩٤	٨ - ٣ - ٢ التحكم في الملوثات الغازية
٢٩٥	٨ - ٤ التلوث الحراري
٢٩٧	٨ - ٥ التلوث الناتج عن النفايات الصلبة
٢٩٩	ملحق رقم (١)
٣٠٣	ملحق رقم (٢)

* * *

الفصل الأول
مقدمة عامة

التطور التاريخي لاستخدام الطاقة

تعتبر الطاقة إحدى المفاهيم المألوفة والشائعة الاستعمال في الحياة اليومية . ويمكن وصف الطاقة بعدة طرق ولكن أيّاً من هذه الطرق لا يعطي تعريفاً متكافئاً للطاقة . فالطاقة هي الحرارة والضوء والكهرباء والقابلية لإنجاز شغل مفيد .

والحياة على هذه الأرض غير ممكنة من دون الطاقة لأن الطاقة هي التي تُنمي النباتات التي تمثل المصدر الأساسي للغذاء لجميع الكائنات الحية . والطاقة هي التي تجعل الإنسان قادراً على الحركة وتشغل جميع الوسائل التي يستخدمها في تنقلاته .

استعمل الإنسان البدائي عضلاته فقط لتحويل الطاقة إلى شغل مفيد . وفي بداية التاريخ الإنساني توافر للإنسان مصدران أساسيان للطاقة هما طاقة الشمس الإشعاعية والطعام الذي يتناوله . وعندما اكتشف الإنسان النار كانت تلك أسرع وسيلة استخدمها لتحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في أخشاب الأشجار إلى طاقة حرارية . وبعد ذلك اكتشف الإنسان مصادر أخرى للطاقة الكيميائية (الوقود) مثل الغاز الطبيعي والفحم الحجري والنفط .

إن الطاقة الكيميائية المخزنة في الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي والتي تعدّ المصادر الرئيسة للطاقة في وقتنا الحاضر هي في الأصل طاقة شمسية . ذلك لأن الطاقة الشمسية اختُزنت في النباتات (بواسطة عملية التمثيل الضوئي) ومن ثم في الكائنات الحية التي تتغذى على هذه النباتات خلال فترات نموها .

وقد تحولت هذه الكائنات من نباتات وحيوانات إلى فحم حجري ونفط في

باطن الأرض عبر العصور السحيقة بفعل الضغوط ودرجات الحرارة المرتفعة كما يرى أغلب المختصين في هذا المجال .

اكتشف الفحم الحجري في القرن الثامن عشر وتم فيما بعد استخراج غاز من هذا الفحم استعمل للإضاءة ، ثم تمكن الإنسان بعد ذلك من تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية عند اكتشافه للآلة البخارية ، وكانت أول مضخة حرارية استعمل الخشب كوقود لها هي تلك التي اخترعها الإنجليزي توماس سافري عام ١٦٩٨ م . وفي عام ١٧٩١ م اخترع الإيطالي الساندرو فولتا المركم الرصاصي الكهربائي الذي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية . وبعد ذلك بحوالى قرن تم تطوير كل من المحرك الكهربائي والمولد الكهربائي (الدينامو) حيث أصبح بالإمكان بواسطتهما تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية وبالعكس .

حُفر أول بئر للنفط في العالم في ولاية بنسلفانيا الأميركية عام ١٨٥٩ م ، وفي عام ١٨٦٠ م قام مهندس فرنسي يدعى جين جوزيف ببناء أول محرك احتراق داخلي وكان هذا المحرك ذا فعالية منخفضة ، وفي عام ١٨٧٦ م اخترع الألماني نيكولاس أوتو محرك الاحتراق الداخلي ذي الأشواط الأربعة ، ثم قام عالم ألماني آخر بعد ذلك باختراع المكربن (المغذي Carburater) ، ثم قام عالم ألماني ثالث بتصميم أول محرك سيارة يعمل بالبنزين . ومنذ ذلك الحين أخذت صناعة السيارات تتطور بسرعة وأصبح النفط مصدراً هاماً للطاقة كالفحم الحجري ، وتعددت استعمالاته في الميادين كافة ، فقد استخدمت مركبات الوقود الزيتي الخفيفة في مجال التدفئة المركزية ، كما استخدمت مركباته الثقيلة في تشغيل محركات السفن في حين استخدم زيت الديزل في المركبات الأرضية الثقيلة والقطارات وفي إنتاج الكهرباء في محطات التوليد .

استخدم البنزين كمصدر للطاقة في الجيل الأول من محركات الطائرات ثم استخدم الكيروسين (الكاز) في وقت لاحق في محركات الطائرات النفاثة الحديثة .

خلال التنقيب عن النفط ، اكتشف المهندسون مصدراً هاماً آخر من مصادر الطاقة الكيميائية هو الغاز الطبيعي المكون من الميثان (methane) بشكل رئيس .

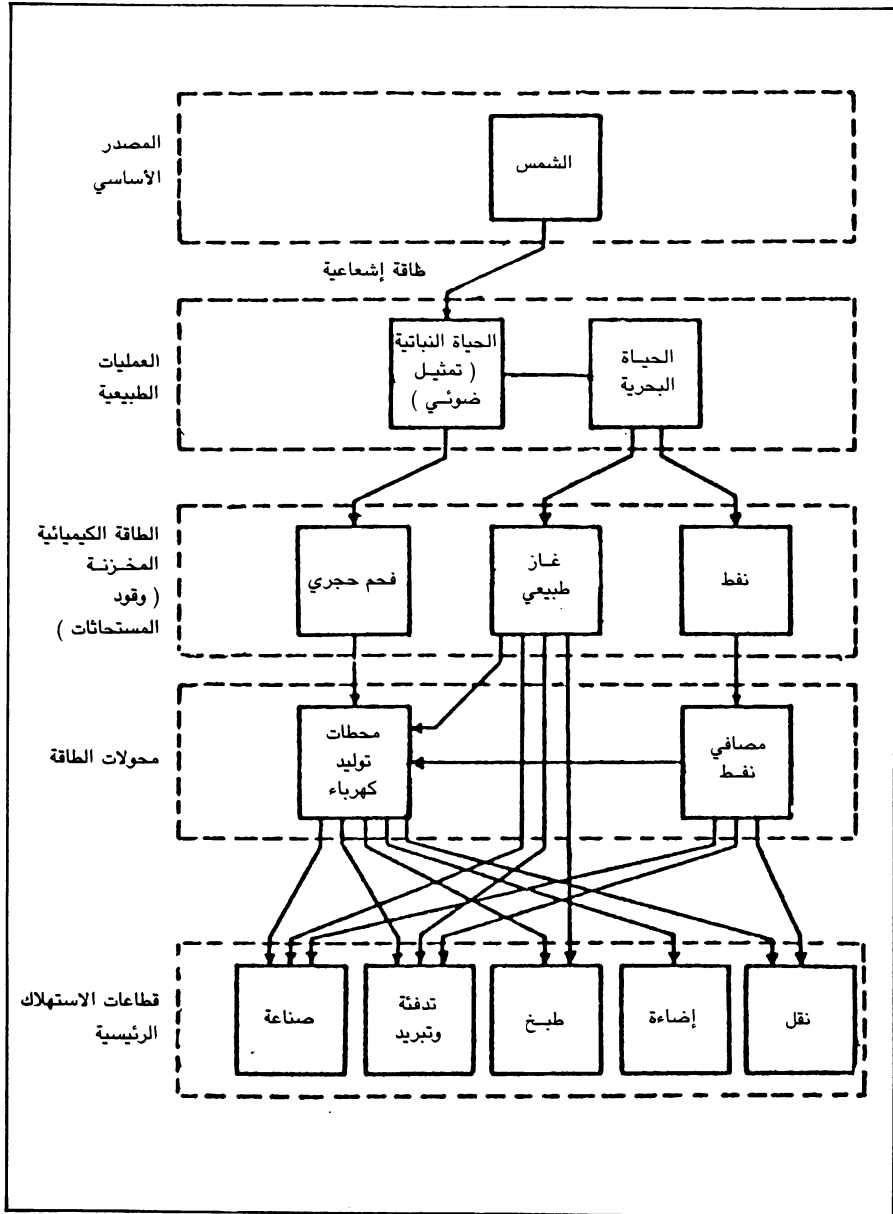
وقد استخدم هذا الغاز بشكل واسع في الصناعة وتدفئة المنازل وتبريدها وتم إيصاله للبيوت بواسطة أنابيب أو بتعبئته كسائل في اسطوانات مضغوطة وذلك لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية .

كما رأينا فإن الشمس هي المصدر الأساسي للطاقة على هذه الأرض. ويمكن تمثيل انسياب الطاقة من الشمس إلى محطات الاستهلاك الرئيسة للطاقة بواسطة المخطط في الشكل (١ - ١) .

اعتمد تقدم وتطور الحضارة البشرية عبر حقب التاريخ المختلفة إلى حد بعيد على تطور مقدرة الإنسان على تسخير الطاقة من مصادرها المختلفة لمواجهة المتطلبات المواكبة لهذا التطور . يبين الجدول (١ - ١) العلاقة الوثيقة بين تقدم المجتمعات البشرية في ضوء تطور استهلاكها من الطاقة عبر حقب التاريخ .

الدور	كيلوغرام فحم حجري مكافئ في اليوم
المجتمع البدائي	٠,٣
المجتمع الاقطاعي	٠,٧
المجتمع الزراعي البدائي	١,٨
المجتمع الزراعي المتطور	٣,٨
المجتمع الصناعي	١١,٢
المجتمع المتطور تكنولوجياً	٣٣,٣

الجدول (١ - ١)
تقديرات الاستهلاك الفردي للطاقة في الأدوار التاريخية المختلفة



الشكل (١ - ١)
 انسياب الطاقة من الشمس
 إلى قطاعات الاستهلاك الرئيسية

٢ - ١

معدلات النمو في استهلاك الطاقة

عندما تتزايد قيمة كمية — كالقدرة مثلاً — بمعدل ثابت i في كل عام ، يمكن إيجاد تغير هذه القيمة الكمية الزمني من المعادلة الآتية :

$$\frac{dp}{dt} = pi \quad (١ - ١)$$

وإذا افترضنا أن القدرة الابتدائية هي (P_0) عند زمن اختياري $(t = 0)$ ، يمكن إجراء تكامل لطرفي المعادلة $(١ - ١)$:

$$\int_{p_0}^p \frac{dp'}{p'} = \text{Ln} \left(\frac{p}{p_0} \right) = \int_0^t i \, dt = it \quad (٢ - ١)$$

وبذلك تكون :

$$P = p_0 e^{it} \quad (٣ - ١)$$

يمثل الرمز (e) أساس اللوغاريتمات الطبيعية الذي يساوي $(2.7182818...)$.

لنفترض أن (td) هو زمن المضاعفة (doubling time) أي الزمن اللازم لتصبح القدرة المستهلكة ضعف القدرة الابتدائية فيمكن إيجاد هذا الزمن من

المعادلة (١ - ٣) وذلك بتعويض ($P = 2p_0$) و ($td = t$) في المعادلة (١ - ٣)

$$2p_0 = p_0 e^{itd}$$

بقسمة طرفي المعادلة على (p_0) وأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة

$$\ln(2) = \ln(e^{itd}) \Rightarrow \ln(2) = itd$$

$$td = \ln(2) / i = 0.0693 / i \quad (١ - ٤)$$

وكمثال تطبيقي على المعادلة (١ - ٤) ليكن معدل النمو في استهلاك القدرة الكهربائية في بلد ما هو ٧ ٪ في العام فإن زمن المضاعفة (td)

$$td = 0.0693 / 0.07 = 9.9 \text{ years}$$

يمكن إيجاد الطاقة المستهلكة خلال فترة زمنية معينة بإجراء تكامل للمعادلة (١ - ٣) خلال تلك الفترة الزمنية. وإذا أردنا إيجاد الطاقة المستهلكة خلال فترة زمنية سابقة وطويلة جداً فإنه أمر طبيعي أن نفترض أن زمن البداية هو ($t = -\infty$)

فتكون الطاقة الكلية المستهلكة (E_0) من الزمن ($t = -\infty$) إلى زمن اختياري ($t = t_1$) هي :

$$E_0 = \int_{-\infty}^{t_1} p_0 e^{it} dt = \frac{p_0}{i} e^{it} \Big|_{-\infty}^{t_1}$$

$$= \frac{p_0}{i} e^{it_1} - \frac{p_0}{i} e^{i(-\infty)} = \frac{p_0}{i} e^{it_1} - 0$$

$$E_0 = \frac{p_0}{i} e^{it_1} \quad (١ - ٥)$$

وتكون الطاقة المستهلكة فترة زمنية من ($t = t_1$) إلى ($t = t_2$) هي :

$$E_1 = \int_{t_1}^{t_2} p_0 e^{it} dt = \frac{P_0}{i} (e^{it_2} - e^{it_1})$$

$$= \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i[t_2 - t_1]} - 1)$$

$$E_1 = E_0 (e^{i[t_2 - t_1]} - 1) \quad (٦ - ١)$$

إذا عوضنا ($t_d = t_2 - t_1$) في المعادلة (٦ - ١) نحصل على النتيجة ($E = E_0$)

وهذا يعني أن الطاقة المستهلكة خلال زمن المضاعفة (t_d) أو فترة التضاعف تساوي الطاقة الكلية المستهلكة خلال الزمن السابق لهذه الفترة .

مثال ١ - ١

إذا علمت أن استهلاك الأردن من النفط عام ١٩٨١م هو ١,٨١ مليون طن، ما هو مقدار الاستهلاك المتوقع من النفط عام ١٩٩٠م بفرض أن معدل النمو في الاستهلاك خلال هذه الفترة يبقى ثابتاً ويساوي ٩,٥ ٪ في العام؟ وما هو الزمن اللازم لكي يتضاعف استهلاك الأردن من النفط إذا بقي معدل النمو في الاستهلاك ثابتاً خلال فترة التضاعف ؟

نفرض أن (P) هو استهلاك الأردن من النفط في سنة معينة

$$P_{90} = P_{81} e^{it}$$

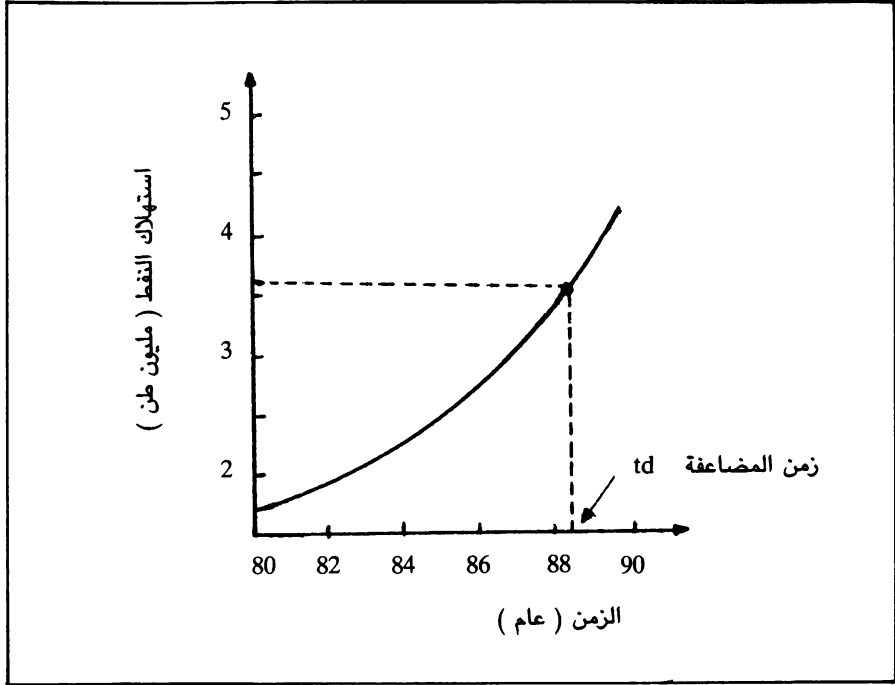
$$t = 1990 - 1981 = 9 \text{ years}$$

$$P_{90} = 1.81 e^{(0.095)(9)} = 4.26 \text{ (million ton / year)}$$

ويكون زمن المضاعفة (t_d)

$$t_d = 0.693 / i = 0.693 / 0.095 = 7.3 \text{ years}$$

يبين الشكل (١ - ٢) منحنى تزايد (نمو) استهلاك النفط في الأردن في الفترة الواقعة بين عامي (١٩٨٠ - ١٩٩٠ م) بالاعتماد على القيم المحسوبة في مثال ١ - ١ ، وكما نلاحظ من الرسم فإن الاستهلاك يتضاعف عما كان عليه عام ١٩٨١م وذلك في عام ١٩٨٨م تقريباً .



الشكل (١ - ٢)
نمو استهلاك النفط في الأردن

مثال ١ - ٢ :

قُدر استهلاك الأردن من الطاقة عام ١٩٨٢م بحوالى $٢,٢ \times ١٦١٠$ جول. احسب مقدار ما كان عليه هذا الاستهلاك عام ١٩٧١م ، وإذا علمت أن معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية بين عامي (٧١ - ٨٢ م) هو ١٣,٨ ٪ في العام، احسب مقدار الاستهلاك المتوقع عام ١٩٩٠م . وبفرض أن

معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية (٨٢ — ٩٠ م) ثابت ومقداره ٨ ٪ في العام . ما هو الزمن اللازم ليصبح الاستهلاك ضعف ما كان عليه عام ١٩٨٢ م ، ثم احسب الطاقة التي استهلكها الأردن في الفترة (٧١ — ٨٢ م) .

$$P_{82} = P_{71} e^{it}$$

$$t = 1982 - 1971 = 11 \text{ years}$$

استهلاك الأردن من الطاقة عام ١٩٧١ م

$$2.2 \times 10^{16} = P_{71} e^{(0.138)} \quad (11)$$

$$P_{71} = 2.2 \times 10^{16} / e^{1.518} = 4.82 \times 10^{15} \text{ J / year}$$

أي أن الاستهلاك عام ٨١ م زاد عنه عام ٧١ م بمقدار

$$2.2 \times 10^{16} / 4.82 \times 10^{15} = 4.56 \text{ times}$$

الاستهلاك عام ٩٠ م

$$P_{90} = P_{82} e^{(0.08) (90 - 82)}$$

$$= 2.2 \times 10^{16} e^{0.64} = 4.17 \times 10^{16} \text{ J}$$

زمن المضاعفة (t_d)

$$t_d = 0.693 / i = 0.693 / 0.08 = 8.7 \text{ years}$$

يتضاعف الاستهلاك عما كان عليه عام ٨٢ م في عام

$$1982 + 8.7 \approx 1991$$

مجموع الطاقة الكلية المستهلكة قبل عام ٧١ م

$$E(71 - 82) = \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i[t_2 - t_1]} - 1)$$

$$P_0 = P_{71} = 4.82 \times 10^{15} \text{ J / year}$$

$$t_1 = 0 \rightarrow t_2 = 82 - 71 = 11 \text{ years}$$

$$E(71 - 82) = \frac{4.82 \times 10^{15}}{0.138} [e^{(0.138)(11)} - 1] = 1.81 \times 10^{16} \text{ J}$$

مثال ١ - ٣ :

قُدِّر الاحتياطي العالمي من طاقة الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي عام ١٩٧٠م بحوالي ٢,٢ × ٢٣١٠ جول. إذا علمت أن استهلاك العالم من الطاقة عام ١٩٧٠م هو ٢,٠٤٥ × ٢٠١٠ جول فما هي الفترة الزمنية اللازمة لاستنفاد هذا الاحتياطي بفرض أن معدل النمو في الاستهلاك للعالم من الطاقة يبقى ثابتاً ويساوي ٥ ٪ في العام؟

$$P_0 = P_{70} = 2.045 \times 10^{20} \text{ J / year}, i = 0.05$$

نفرض أن عام ٧١ يقابل زمن اختيار هو $t_1 = 0$

$$E_1 = E_{70} = 2.2 \times 10^{23} \text{ J}$$

$$E_1 = \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i[t_2 - t_1]} - 1)$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} e^{(0)} [e^{(0.05)(t_2 - 0)} - 1]$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} [e^{0.05t_2} - 1]$$

$$e^{0.05t_2} - 1 = 53.79$$

$$e^{0.05t_2} = 54.79$$

$$0.05t_2 = \ln(54.79) = 4$$

$$t_2 = 4 / 0.05 = 80 \text{ years}$$

أي أن الاحتياطي العالمي من هذه المصادر الثلاثة سوف ينفد في عام

$$1970 + 80 = 2050$$

ملاحظة : تُعدّ هذه المصادر من نفط وفحم حجري وغاز المصادر الرئيسة للطاقة في العالم وتشكل أكثر من ٩٠ ٪ من مجموع الطاقة المستهلكة .

مثال ١ - ٤ :

كان استهلاك الأردن من النفط عام ١٩٨٣م يساوي ٢,٤ مليون طن والذي هو أعلى بمقدار ٢ ٪ من استهلاك عام ١٩٨٢م . إذا كان الاكتشاف الحديث للنفط في الأردن ، يمكن أن ينتج ما مقداره ٤٠٠ برميل (barrel) في اليوم (طن النفط يساوي ٧ براميل تقريباً) :

١ - في أي عام كانت كمية النفط المكتشفة ، يمكن أن تفي باحتياجات الأردن من النفط بافتراض أن معدل النمو المذكور كان ثابتاً ؟

٢ - إذا كانت منطقة النفط المكتشف بحاجة إلى خمس سنوات (ابتداءً من عام ١٩٨٣م) للتطوير وحفر المزيد من الآبار ، فما مقدار الإنتاج المطلوب - في نهاية هذه الفترة - لسدّ احتياجات الأردن من النفط ؟

٣ - إذا لم يتم اكتشاف المزيد من النفط - غير الكمية المكتشفة والتي تساوي ٤٠٠ برميل في اليوم - ، فكم تكفي هذه الكمية محطة الحسين الحرارية في الزرقاء إذا كانت قدرة هذه المحطة تساوي ٣٦٥ ميغاواط (القدرة القصوى) إذا علمت أن الكفاءة الحرارية للمحطة هي ٣٥ ٪ والقيمة الحرارية العليا للنفط الخام (H H V) هي ٤٢١٠٠ كيلوجول / كغم .

١ - في عام ١٩٨٣م كان الاستهلاك يساوي ($2.4 \times 10^6 \text{ ton / year}$)

$$i = 0.02$$

معدل النمو

$$\frac{400}{7} \times 365 = 20857.14 \text{ ton / year}$$

الاستهلاك السنوي

كان هذا الاستهلاك كافٍ في عام

$$P = p_0 e^{it}$$

$$P_{83} = p_0 e^{it}$$

$$2.4 \times 10^6 = 20857.14 e^{0.02 t}$$

$$t = 237.3 \text{ years}$$

$$\text{year} = 1983 - 237.3 \approx 1746$$

$$P_{88} = P_{83} e^{it} \quad \text{— ٢}$$

$$P_{88} = 2.4 \times 10^6 e^{0.02 \times 5} = 2.65 \times 10^6 \text{ ton / year}$$

٣ — القدرة الحرارية = القدرة الكهربائية / الكفاءة الحرارية

$$P_{th} = 365 \times 10^3 \text{ KW} / 0.35 = 10.429 \times 10^5 \text{ KW}$$

الطاقة الحرارية المستهلكة في اليوم

$$E_{th} / \text{day} = 10.429 \times 10^5 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \times 24 \times 3600 \text{ S} = 9.01 \times 10^6 \text{ KJ}$$

كتلة الوقود اللازمة في اليوم

$$\text{Fuel} / \text{day} = 9.01 \times 10^{10} \text{ KJ} / 42100 \text{ kg} = 2.14 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$1 \text{ barrel} = \frac{1000}{7} = 142.86 \text{ kg}$$

كتلة الوقود المتوفرة في اليوم

$$\text{Fuel available} / \text{day} = 142.86 \times 400 = 57144 \text{ kg}$$

زمن تشغيل المحطة باستخدام كمية الوقود المتوفرة

$$\text{Time} = \frac{57144 \text{ kg}}{2.14 \times 10^6 \text{ kg} / \text{day}} = 0.0267 \text{ day}$$

$$\text{Time} = 0.0267 \text{ day} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} = 38.45 \text{ minutes}$$

زيادة الطلب على الطاقة تأثير التزايد السكاني والتطور التكنولوجي

يحتاج الإنسان إلى الطاقة لتسيير جميع مناحي حياته اليومية، فالطاقة ضرورية لطبخ الطعام وإنارة البيوت والشوارع وتشغيل جميع الأجهزة الكهربائية المستخدمة في البيوت لتحقيق الراحة للإنسان. والطاقة ضرورية أيضاً في النقل بمختلف أنواعه وفي الصناعة . وفي مجال الزراعة تحول الإنسان من الاعتماد على الحيوانات إلى الاعتماد — بشكل متزايد — على الآلات الزراعية المختلفة التي تستخدم بعض مشتقات النفط كوقود لها خصوصاً زيت الديزل .

في المناطق الحضرية (Urban) خصوصاً ، فإن قطاعات كبيرة من السكان تستهلك كميات متزايدة من الطاقة لتوفير ظروف معيشة أكثر راحة ورفاهية في البيوت .

ولا يزال الطلب على الطاقة يزداد يوماً بعد يوم ، ويمكن إرجاع ذلك لسببين رئيسيين هما : (١) الزيادة المضطردة في عدد السكان (٢) ازدياد استهلاك الفرد للطاقة باستمرار بسبب زيادة التقدم التكنولوجي وتطور وسائل الترفيه والراحة .

يتزايد مقدار السكان في العالم بمعدل ٢ ٪ تقريباً في كل عام ، في حين أن معدل استهلاك الطاقة العالمي يزداد بمعدل يصل إلى ٥ ٪ أو أكثر في كل عام وذلك تبعاً للأرقام المتوافرة بين عامي ١٩٦٠م و١٩٧٨م. ويبين الجدول (١ - ١) التطور في استهلاك مصادر الطاقة الأولية في الفترة الزمنية الواقعة بين عامي (١٩٦٠ - ١٩٧٨ م) .

مصادر الطاقة	١٩٦٠م (مليون طن) %	١٩٧٨م (مليون طن) %	معدل النمو السني المركب (٦٠ - ٧٨)
الوقود الصلب	٣٣٠٦	٣٨٠٣	١,٣
الوقود السائل	١٣٦٢	٣٩٥٩	٦,١
الغاز الطبيعي	٥٩٣	١٧٣٧	٦,٣
الكهرباء (كهرومائية + ذرية)	٨٥	٢٥٦	٦,٣
المجموع	٤٣٤٦	٨٧٥٥	٤,١

الجدول (١ - ١)

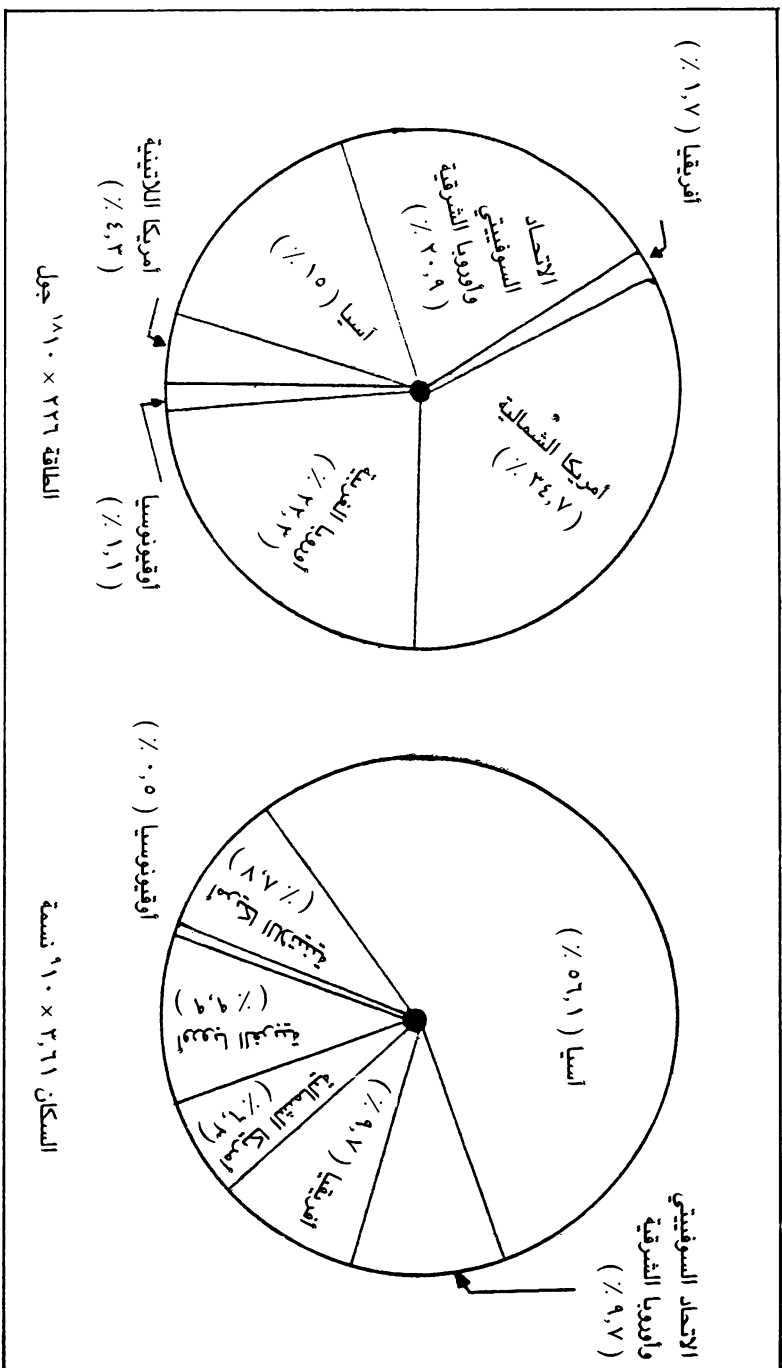
تطور استهلاك المصادر الأولية للطاقة بين عامي (١٩٦٠ - ١٩٧٨م)

يتوزع الاستهلاك العالمي للطاقة بشكل غير متساو بين قارات العالم المختلفة كما هو مبين في الشكل (١ - ٣) الذي يبين التوزيع المئوي لاستهلاك الطاقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠م. ومن هذا الشكل نجد أن أمريكا الشمالية - التي يشكل عدد سكانها ٦,٣ ٪ فقط من سكان العالم - تستهلك حوالى ٣٥ ٪ من الطاقة العالمية، في حين أن قارة آسيا بأكملها - التي يشكل عدد سكانها أكثر من ٥٦ ٪ من سكان العالم - تستهلك ١٥ ٪ فقط من الطاقة العالمية.

إن هذا التوزيع لاستهلاك الطاقة بين قارات العالم لم يتغير كثيراً بعد عام ١٩٧٠م وإن كان قد انخفض قليلاً بالنسبة لأمريكا الشمالية حيث بلغ نحو ٣١,٣ ٪ عام ١٩٧٨م (نسبة استهلاك الولايات المتحدة شكلت حوالى ٢٨,٦ ٪ من الطاقة العالمية لنفس العام).

ويمكن أن نأخذ فكرة عن احتياجات العالم المستقبلية للطاقة إذا علمنا أن الولايات المتحدة التي تستأثر بأكبر نصيب من استهلاك الطاقة العالمي سوف تستهلك بحلول عام ٢٠٠٠م أكثر مما استهلكته عبر تاريخها، ومن المتوقع أن تتراجع نسبة استهلاكها إلى ٢٥ ٪ من الاستهلاك العالمي وذلك نتيجة لارتفاع معدلات النمو في السكان لبقية العالم عن معدل الولايات المتحدة ونتيجة للتقدم الصناعي المتزايد في الدول النامية وازدياد استهلاك الطاقة.

إن معدل ما يستهلكه الفرد الأمريكي حالياً يزيد عن خمسة أضعاف



الشكل (١ - ٣)
التوزيع النموذجي لاستهلاك الطاقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠م

ما يستهلكه الفرد العالمي ، في حين أنه من المنتظر أن يصل معدل استهلاك الفرد العالمي إلى حوالي ١ / ٣ معدل الفرد الأمريكي عام ٢٠٠٠ م .

يبين الجدول (١ - ٢) استهلاك الطاقة في بعض البلدان العربية والعالمية لعام ١٩٧٨ م ، ويبين الجدول (١ - ٣) تطور معدل الاستهلاك الفردي العالمي للطاقة في الفترة (١٩٠٠ - ١٩٧٨ م) .

البلد او المنطقة	الاستهلاك (مليون طن متري)	نسبة الاستهلاك من العالم (%)	استهلاك الفرد (كغم)
الأردن	١,٥٩١	٠,٠٢	٥٣٥
الإمارات العربية المتحدة	٤,٥٢٦	٠,٠٥	١٨٥٤٨
الجزائر	١٢,٧٢٧	٠,١٥	٦٨٧
سوريا	٧,٨٣١	٠,٠٩	٩٦٨
العراق	٧,٨٠١	٠,٠٩	٦٣٣
السودان	٢,٩٠٤	٠,٠٣	١٧٢
قطر	٢,٣٨٩	٠,٠٣	٢٣٦٥٨
الكويت	٨,١١٢	٠,٠٩	٦٧٧١
مصر	١٨,٣٤١	٠,٢١	٤٦٣
السعودية	١٢,٨١٥	٠,١٥	١٣٠٦
أندونيسيا	٤٠,٨٣٣	٠,٤٧	٢٧٨
فنزويلا	٣٩,٢٢	٠,٤٥	٢٩٨٩
نيجيريا	٧,٢٩٧	٠,٠٨	١٠٦
الولايات المتحدة	٢٥٠٢,١٣٢	٢٨,٥٨	١١٣٧٤
المكسيك	٩٢,٦٢١	١,٠٦	١٣٨٤
أوروبا الغربية	١٥٦٦,٣٥٨	١٧,٨٩	٤٢٤٥
الاتحاد السوفييتي	١٤٤٥,٤٣٩	١٦,٥١	٥٥٠٠
الصين	٧٦٦,٣٣٥	٨,٧٥	٨٣٧

الجدول (١ - ٢)
استهلاك الطاقة في بلدان مختارة
من العالم العربي وبقية العالم

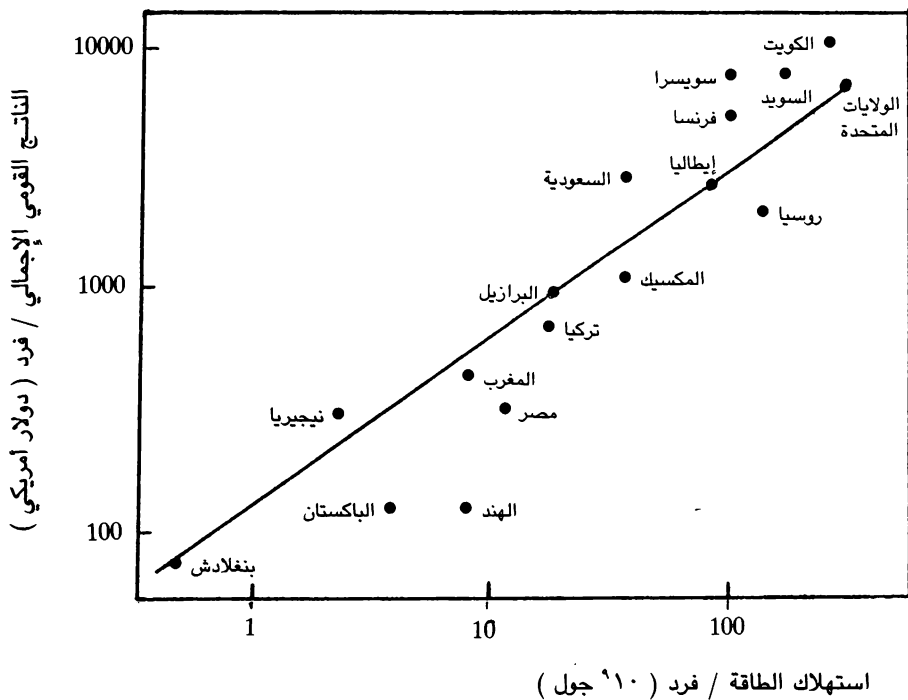
السنوات	كيلوغرام مكافئ فحم حجري
١٩٠٠	٥٩٠
١٩٥٠	١٦٠٠
١٩٦٠	٢١٠٠
١٩٧٠	٢٩٠٠
١٩٧٨	٢٠٧٤

الجدول (١ - ٣)
تطور معدل الاستهلاك الفردي العالمي للطاقة

إن الزيادة — غالباً — في استهلاك الطاقة يصاحبها ارتفاع في مستوى المعيشة ممثلاً في زيادة الناتج القومي الإجمالي (Gross National Product, GNP) للبلد .

وكما هو مبين في الشكل (١ - ٤) هناك علاقة خطية بين استهلاك الطاقة الفردي وبين الناتج القومي الإجمالي الفردي . ومن هذا الشكل نرى أن بعض البلدان مثل الولايات المتحدة والكويت وسويسرا والسويد ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة مرتفعين ، في حين أن هناك بلداناً أخرى كالهند والباكستان ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة منخفضين .

ازداد استهلاك الطاقة في الأردن بشكل كبير جداً حيث بلغ معدل النمو السنوي في الاستهلاك في الفترة الواقعة بين عامي (١٩٧٤ — ١٩٨٤ م) نحو ١٣,٦ ٪ ولكنه عاد وانخفض إلى ٣,١ بين عامي ١٩٨٥ و ١٩٧٨، في حين ارتفع الناتج القومي الإجمالي الفردي من حوالي ٥٢٧ ديناراً عام ١٩٨٠م إلى حوالي ٧١٣ ديناراً عام ١٩٨٣م، ولكنه عاد وتراجع إلى حوالي ٦٨٠ ديناراً عام ١٩٨٧م ، فالأردن كغيره من الدول النامية يواجه مشكلة الزيادة المتواصلة في معدلات استهلاك الطاقة ، ولعل ذلك يرجع أساساً إلى التوسع والنمو الذي طرأ على مختلف القطاعات الصناعية والتجارية وقطاع النقل وإلى استمرارية نشر خدمة التيار الكهربائي في مختلف المناطق وما يترتب على ذلك من زيادة وتشجيع لاستهلاك الطاقة الكهربائية، إذ انه حتى عام ١٩٧٩م كانت خدمة التيار الكهربائي تقتصر على ٥٥ ٪ من سكان الأردن فقط.



الشكل (١ - ٤)
العلاقة بين الناتج القومي الإجمالي / فرد
واستهلاك الطاقة / فرد لبعض البلدان لعام ١٩٧٥م

١ - ٤

أزمات الطاقة : أبعادها وأسبابها والحلول المناسبة

تحسنت ظروف الإنسان المعيشية تحسناً ملموساً خلال القرون الأربعة الأخيرة، خصوصاً في بلدان أوروبا الغربية بعد الثورة الصناعية في القرن السابع عشر ، وبدأت عملية انتشار الآلات تزداد بشكل واسع وذلك بعد اختراع الآلة البخارية وتطورها ، وظهرت ملامح أول أزمة وقود في العالم في بريطانيا متمثلة في حدوث نقص في إمدادات أخشاب الأشجار المستعملة كوقود لهذه الآلات الجديدة ، ولكنه تم السيطرة على هذه الأزمة وذلك باستخدام الفحم الحجري بدلاً من الأخشاب كوقود لهذه الآلات وإحلال فحم الكوك (Coke) مكان الفحم النباتي كمصدر للحرارة في أفران صهر الحديد . وهكذا أوجدت الثورة الصناعية طرقاً جديدة زادت من الإنتاجية وساهمت في تحسين ظروف الحياة لقطاع كبير من الناس .

وصلت الصناعات المعتمدة على الفحم الحجري والآلات البخارية ذروتها في أواخر القرن التاسع عشر ، وكان الاستغلال لمصادر الطاقة المتوافرة على أشده في تلك الفترة .

وببزوغ عصر النفط واستخدامه كمصدر أساسي للوقود واكتشاف المولد الكهربائي (الدينامو) ، فإن ذلك أحدث تغييراً كبيراً جداً في أنماط الحياة في البلدان الأوروبية . وامتد هذا التغيير فيما بعد ليشمل بلداناً أخرى عديدة خصوصاً البلدان التي اكتشف فيها النفط بكميات كبيرة . ورافق هذا التغير أيضاً تطور استخدام محركات الاحتراق الداخلي (Internal combustion engines) في قطاعات الصناعة والنقل والآلات الزراعية ، وبنهاية الحرب العالمية الثانية أصبح

النفط كمصدر للطاقة أرخص بكثير من الفحم الحجري ، مما أدى إلى تحول معظم الصناعات من الفحم الحجري إلى النفط مما زاد الطلب عليه بشكل حاد .

إن هذا التغير في أنماط استغلال الوقود — مع وجود التصنيع الثقيل وزيادة الاعتماد على الآلة — أدى إلى حدوث نقص في إمدادات الوقود ، وأطلق على ذلك اسم أزمة الطاقة (Energy crisis) . وكان لقرار بعض الدول العربية المنتجة للنفط في خريف عام ١٩٧٣م بحظر تصدير النفط للغرب أثر مباشر على الارتفاع المفاجيء والحاد في أسعار النفط العالمية (أربعة أضعاف السعر قبل الحظر) .

وأدى ذلك إلى ردود فعل عالمية واسعة خصوصاً من قبل البلدان الكبرى المصنعة في أمريكا الشمالية وأوروبا الغربية واليابان التي كانت تعتمد على النفط الرخيص بشكل متزايد في معظم صناعاتها ، ولم يقتصر هذا التأثير على الدول المصنعة بل امتد إلى الدول النامية التي تعتمد على مشتقات النفط كمصدر أساسي لاحتياجاتها من الطاقة وكمصدر هام للأسمدة المستعملة في تخصيب الأراضي الزراعية ، وقد أدى كل ذلك إلى تفاقم ما يسمى بأزمة الطاقة .

كما ذكرنا سابقاً فإن تزايد الطلب على الطاقة يعزى إلى تزايد عدد السكان وزيادة استهلاك الفرد من الطاقة نتيجة للتطور والتقدم التكنولوجي واختراع الإنسان لوسائل الراحة والترفيه وزيادة اعتماده على الآلة في كافة شؤون حياته ، وإذا أراد الإنسان المحافظة على مستوى معيشته وحضارته فلا بد له من إيجاد الحلول المناسبة لمشكلة الطاقة ، والاقتراحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة لأزمة الطاقة :

١ — تقليل اعتماد الإنسان على مصادر الطاقة التقليدية (غير المتجددة) من فحم حجري ونفط وغاز طبيعي والتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة ما أمكن ذلك ، فهناك الكثير من مصادر الطاقة المتجددة التي لم يتم استغلالها بشكل مرض . فالطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح — اللتان يمكن الحصول على الطاقة الكهربائية منهما مباشرة — لم يتم استغلال سوى نسب قليلة منهما ، أما طاقة المد والجزر ، فلا يتم استغلال سوى جزء بسيط منها في أماكن محدودة من العالم ، وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الحرارية الجوفية . ويمكن أن تلعب بعض المصادر الثانوية الأخرى كأخشاب الأشجار ومخلفات الزراعة والقمامة دوراً هاماً في حل مشكلة الطاقة إذا تم التوسع في استغلالها خصوصاً في الدول النامية. فهي

مصادر متوافرة في كل مكان تقريباً وبشكل مستمر . ويرى بعض المختصين أن الطاقة النووية يمكن أن تقدم حلاً جذرياً لأزمة الطاقة إذا تم استغلالها على نطاق واسع ، خصوصاً بعد التقدم العلمي الكبير في تصنيع المفاعلات النووية، وإن كانت مشكلة التلوث وأخطار الحوادث قائمة بالنسبة لهذا المصدر الهائل من الطاقة ، وأهم مشاكل التلوث النووي هي مشكلة التخلص من النفايات المشعة التي تولدها المفاعلات النووية .

بقي أن نشير إلى أهم مصدر من مصادر الطاقة المتجددة ألا وهو الطاقة الشمسية، فعلى الرغم من التقدم الكبير الذي تم إحرازه في استغلالها في بعض التطبيقات المباشرة كتسخين المياه في المنازل وتحمية المياه المالحة والأفران الشمسية وغيرها ، إلا أن أهم مجال لاستخدامها في إنتاج الطاقة الكهربائية على نطاق واسع لا يزال محدوداً ومحصوراً في بعض الدول المتقدمة علمياً ، وأخيراً فإن هناك بعض المصادر الأخرى غير المتجددة التي لا يتم استغلالها بشكل واسع مثل الصخر الزيتي (Shale Oil) الذي يتوافر منه احتياطي كبير في الأردن .

٢ — تقليل الفواقد أو الضياعات من أجهزة تحويل الطاقة خصوصاً محطات التوليد الكبيرة، حيث انه بالإمكان الاستفادة من الغازات العادمة ذات درجة الحرارة العالية بدلاً من تركها تنطلق في الجو ، وهناك وسائل أخرى عديدة لتقليل الفواقد من هذه المحطات . أما على مستوى الأفراد فإنه بالإمكان توفير الطاقة وذلك بواسطة الاستخدام الصحيح لأجهزة تحويل الطاقة في المنازل . ويرى بعض الخبراء المختصين أنه بالإمكان توفير نصف الطاقة الحرارية المنتجة في المنازل في وقتنا الحاضر إذا تم استخدام أجهزة الطاقة في البيوت بوعي أكبر وتجنب الأفراد بعض الممارسات المبالغ بها والتي تؤدي إلى هدر الطاقة ، كتشغيل أجهزة التدفئة في الأيام المعتدلة أو عدم إيقافها عن العمل عند الخروج من البيت لفترات طويلة .

١ - ٥

طبيعة الطاقة

١ - ٥ - ١ الشغل والطاقة :

يُعرف الشغل بأنه حاصل ضرب القوة في المسافة التي تتحركها نقطة تأثير القوة في اتجاه هذه القوة . ويمكن تعريف الطاقة بأنها القابلية لإنجاز شغل . فعند رفع جسم (كتلة) مسافة معينة فإنه يلزم قوة أكبر بقليل من وزن هذا الجسم في اتجاه معاكس لاتجاه تأثيره، وبرفع هذا الجسم إلى مستوى أعلى من مستواه الأصلي فإنه يُبدلُ عليه شغل يُخترن فيه على شكل طاقة (طاقة وضع)، ويمكن استرجاع هذا الشغل عند سقوط الجسم إلى مستواه الأصلي .

هناك أشكال متعددة من القوى في الطبيعة مثل قوة المرونة وقوة الجاذبية وقوة الرياح والقوى المائية وغيرها . وجميع هذه القوى قادرة على إنجاز شغل .

١ - ٥ - ٢ الطاقة والقدرة ووحدات القياس :

تُعرف القدرة بأنها معدل الطاقة المبذولة (الشغل المبذول) في وحدة الزمن ($P = dE / dt$) . وفي النظام العالمي المعياري للوحدات (SI) يقاس كل من الشغل والطاقة بوحدة الجول (J) أو مضاعفات هذه الوحدة مثل الكيلوجول ($1000 \text{ J} = \text{KJ}$) . ولأغراض الفيزياء النووية هناك وحدة صغيرة جداً للشغل أو الطاقة هي الإلكترون - فولت ($1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = \text{eV}$) ، ويُعبر عن الطاقة أحياناً بوحدة القدرة والزمن مثل وحدة الواط - ساعة (W.h) أو الكيلوواط - ساعة ($3.6 \times 10^6 \text{ J} = \text{KW.hr}$) .

أما وحدة القياس الأساسية للقدرة في النظام العالمي فهي الواط (W) ومضاعفات هذه الوحدة هي : الكيلوواط ($1000 \text{ W} = \text{KW}$) ، والميغاواط ($10^6 \text{ W} = \text{MW}$) ، والجيجاواط ($10^9 \text{ W} = \text{GW}$) ، والتيراواط ($10^{12} \text{ W} = \text{TW}$) .

ويعبر عن القدرة أيضاً بوحدة الحصان (hp) . وفي النظام العالمي فإن الحصان يساوي ٧٣٥ واط ($1 \text{ hp} = 735 \text{ W}$) . ويمكن التعبير عن القدرة أحياناً بوحدات الطاقة والزمن مثل الجول في الثانية (J / s) أو الكيلوجول في الثانية (KJ / s) .

١ - ٥ - ٣ أشكال الطاقة :

هناك شكلان رئيسان للطاقة هما الطاقة الانتقالية (Transitional) والطاقة المخزنة (Stored) . فالطاقة الانتقالية هي طاقة متحركة يمكنها الانتقال عبر حدود نظام مثلاً ، كما هو الحال بالنسبة للطاقة الحرارية ، والطاقة المخزنة تتوافر على شكل كتلة كالوقود (طاقة كيميائية) أو موقع في مجال قوة كجسم في مجال الجاذبية الأرضية (طاقة وضع) .

من الممكن تحويل الطاقة المخزنة بسهولة إلى أحد أشكال الطاقة الانتقالية . وبشكل عام يمكن حصر أشكال الطاقة المختلفة في ست مجموعات أساسية هي الطاقة الميكانيكية والطاقة الكهربائية والطاقة الكهرومغناطيسية والطاقة الكيميائية والطاقة النووية والطاقة الحرارية .

في علم الديناميكا الحرارية (التيرموديناميكا) تعرف الطاقة الميكانيكية بأنها الطاقة التي يمكن استخدامها لرفع وزن معين . ويعرف الشكل الانتقالي للطاقة الميكانيكية بالشغل ، ويمكن تخزين هذه الطاقة كطاقة وضع أو طاقة حركة ، فطاقة الوضع هي الطاقة التي تمتلكها المادة أو الكتلة نتيجة لوجودها في مجال قوة ، كالطاقة التي يمتلكها جسم يرتفع عن سطح الأرض مسافة معينة نتيجة لوجوده في مجال الجاذبية الأرضية ، أو الطاقة المصاحبة لغاز مضغوط ، أو الطاقة التي يمتلكها جسم حديدومغناطيسي كالحديد أو النيكل نتيجة لوجوده في مجال مغناطيسي ، أو طاقة المرونة المخزنة في زنبرك مضغوط . أما طاقة الحركة فهي الطاقة التي تمتلكها كتلة من المادة نتيجة لحركتها بالنسبة لجسم (مرجع) آخر ، والحدافة أو عجلة التطاير (Flywheel) تعتبر مثلاً لنظام

يخزن الطاقة الميكانيكية على شكل طاقة حركة . إن الطاقة الميكانيكية هي شكل مفيد جداً من أشكال الطاقة لأنه يمكن تحويلها بسهولة وبكفاءة عالية إلى أشكال أخرى للطاقة .

الطاقة الكهربائية هي الطاقة المصاحبة لتدفق الإلكترونات أو تجمع هذه الإلكترونات . وتقاس هذه الطاقة عادة بوحدة القدرة والزمن كوحدة الواط — ساعة (Watt hours) أو الكيلوواط — ساعة (Kilo Watt hours) ، والشكل الانتقالي للطاقة الكهربائية هو عبارة عن تدفق للإلكترونات وغالباً على شكل تيار كهربائي في موصل معدني . ويمكن تخزين الطاقة الكهربائية كطاقة مجال كهروساكن (Electrostatic-Field) أو طاقة مجال حثي (Inductive-Field) ، فطاقة المجال الكهروساكن هي الطاقة المصاحبة لمجال كهربائي ناتج عن تجمع للشحنات (الإلكترونات) على صفائح مكثف (Capacitor) وطاقة المجال الحثي — تسمى أحياناً بطاقة المجال الكهرومغناطيسي — هي الطاقة المصاحبة لمجال مغناطيسي ناتج عن مرور تيار كهربائي في ملف حثي .

والطاقة الكهربائية كالطاقة الميكانيكية تعتبر شكلاً مرغوباً به لأنه يمكن تحويلها بسهولة وكفاءة إلى أشكال أخرى من الطاقة .

الطاقة الكهرومغناطيسية هي الطاقة المصاحبة للإشعاع الكهرومغناطيسي وتقاس هذه الطاقة بوحدة الإلكترون — فولت (eV) أو الميغإلكترون — فولت (MeV) .

وتعتبر هذه الطاقة شكلاً نقياً للطاقة حيث أنه لا يصاحبها أي كتلة وتتوافر على شكل طاقة انتقالية فقط ، تنتقل بسرعة الضوء . وتحسب الطاقة المتوافرة في الأمواج الكهرومغناطيسية من المعادلة :

$$E = h f = \frac{hc}{\lambda} \quad (٧ - ١)$$

حيث :

E : طاقة الأمواج (J) ،

h : ثابت بلانك (6.626×10^{-34} J.s) ،

f : التردد مقاساً بوحدة الهيرتز (Hz) ،

λ : طول الموجة (m) ،

c : سرعة الضوء ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) ،

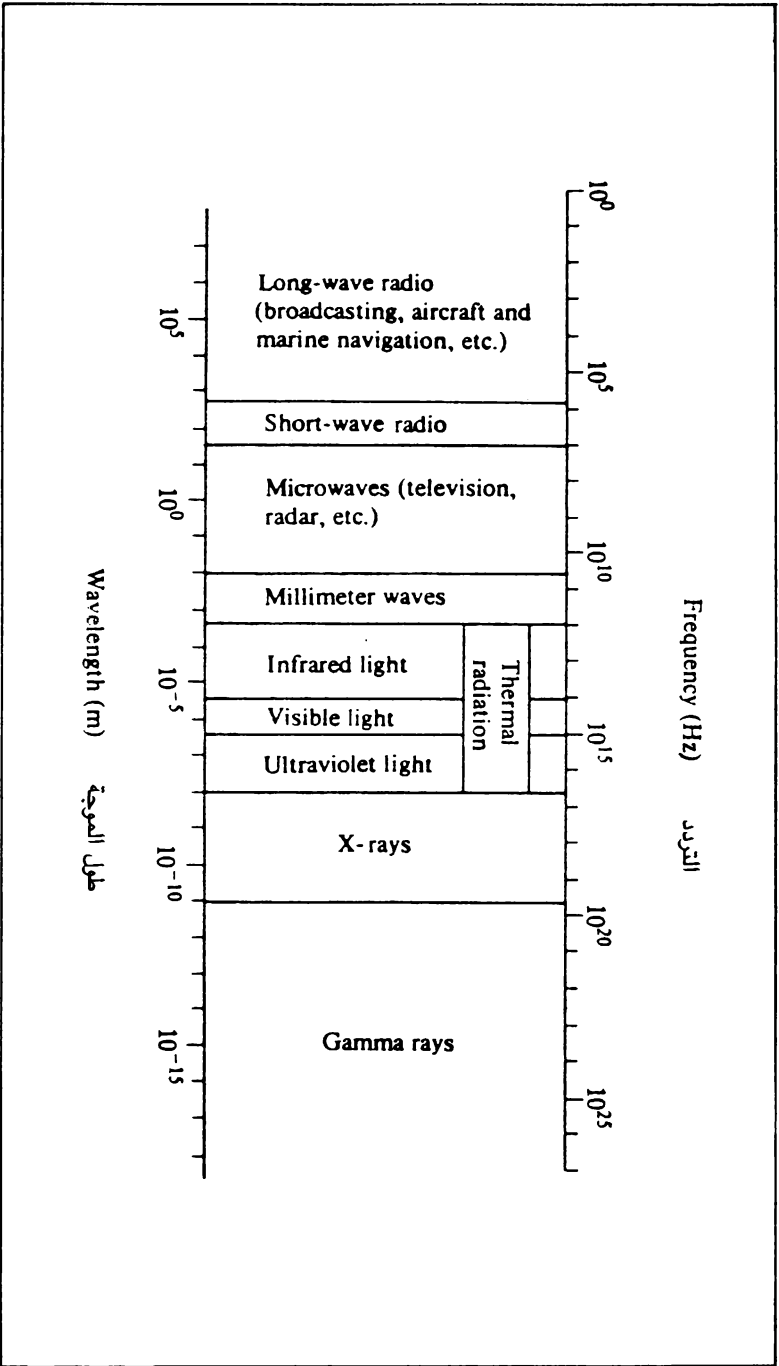
نجد من هذه المعادلة أن الطاقة الموجبة تتناسب طردياً مع تردد الموجة وعكسياً مع طول هذه الموجة . وهناك أنواع متعددة للإشعاع الكهرومغناطيسي تعتمد على طول الأمواج أو طبيعة المصدر المشع . وتعتبر أشعة جاما (Gamma) واحدة من أكثر أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية امتلاكاً للطاقة ، وأغلب هذه الأشعة تبعث من أنوية الذرات . والإشعاع الحراري هو إشعاع كهرومغناطيسي ينتج عن اهتزاز الذرات . ونطاق الإشعاع الكهرومغناطيسي الحراري واسع ، ويشمل الإشعاع ذو درجة الحرارة العالية أو الأشعة فوق البنفسجية (Ultra violet) والنطاق الضيق للأشعة المرئية (Visible radiation) ونطاق الإشعاع ذو درجة الحرارة المنخفضة أو الأشعة تحت الحمراء (Infra red) . ويلي الإشعاع الحراري في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي (أنظر الشكل (١ - ٥)) أشعة الميكرويف والمليميترويف المستعملة في أفران الميكرويف والرادار (Radar) ، أما أشعة أمواج الراديو (Radio wave) فإنها تحتل الطرف الأيسر (طول الموجة الأكبر) من طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي كما هو مبين في الشكل (١ - ٥) .

الطاقة الكيميائية هي الطاقة المحررة (المنطلقة) نتيجة لتفاعل ذرتين أو أكثر أو جزيئين أو أكثر أو خليط منها لتتحد مع بعضها لإنتاج مركب كيميائي أكثر ثباتاً .

وتوجد الطاقة الكيميائية على شكل طاقة مختزنة فقط ، ويسمى التفاعل الذي يطلق الحرارة بالتفاعل الطارد للحرارة (Extho thermic reaction) ، وفي بعض التفاعلات الكيميائية يتم امتصاص الحرارة ، وتسمى هذه التفاعلات بالتفاعلات الماصة للحرارة (Endothermic reactions) ويعتبر الاحتراق — والذي هو تفاعل كيميائي طارد للحرارة — أكثر مصادر طاقة الوقود أهمية للجنس البشري .

الطاقة النووية هي نوع آخر من الطاقة الموجودة على شكل طاقة مختزنة فقط ، ويتم تحرير هذه الطاقة خلال التفاعلات النووية المختلفة ، وتقاس الطاقة المحررة من التفاعل النووي عادة بالميغا إلكترون — فولت (Mev) لكل تفاعل .

وبشكل عام هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية وتشمل الانحلال



الشكل (١ - ٥)
طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي

أو الاضمحلال الإشعاعي (Radiactive decay) ، والانشطار النووي (Fission) ، والاندماج النووي (Fusion) .

الشكل الأخير من أشكال الطاقة هو الطاقة الحرارية المصاحبة لاهتزازات الذرات والجزيئات للمادة، وتعتبر الطاقة الحرارية شكلاً أساسياً من أشكال الطاقة من حيث أنه بالإمكان تحويل كافة أشكال الطاقة الأخرى بشكل كامل إلى طاقة حرارية في حين أن العملية العكسية يحدها القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بشكل كبير .

والشكل الانتقالي للطاقة الحرارية هو الحرارة (Heat) ، ويمكن تخزين الطاقة الحرارية في معظم المواد على شكل حرارة محسوسة (Sensible heat) أو حرارة كامنة (Latent heat) .

١ - ٦

مصادر الطاقة

١ - ٦ - ١ مقدمة:

بالإمكان تصنيف مصادر الطاقة إلى فئتين عامتين :

١ - الطاقة السماوية (الفضائية) أو الطاقة القادمة من خارج نطاق الكرة الأرضية ، وهي الطاقة التي تصل إلى الأرض من الفضاء الخارجي. وتشمل هذه الطاقة جميع المصادر التي يمكن أن تزود الأرض بالطاقة من الفضاء الخارجي. وتتضمن هذه المصادر الطاقة الكهرومغناطيسية وطاقة الجاذبية وطاقة الجسيمات من النجوم والقمر والكواكب بالإضافة إلى طاقة الوضع للنيازك التي تدخل الغلاف الغازي للكرة الأرضية .

في الواقع فإن هناك مصدرين فقط من مصادر الطاقة الفضائية يستفاد منهما فعلاً في إنتاج أشكال أخرى من الطاقة، وهما الطاقة الكهرومغناطيسية من شمس كرتنا الأرضية وتسمى بالطاقة الشمسية المباشرة وطاقة الجاذبية للقمر التي تسبب حدوث ظاهرتي المد والجزر في البحار والمحيطات . إن مصادر الطاقة الفضائية جديرة بالاستغلال بأكبر قدر ممكن لكونها مصادر طاقة مستمرة غير قابلة للنضوب أو الفناء ولأنها غير ملوثة للبيئة نسبياً، وهذا اعتبار هام جداً كما سنرى فيما بعد .

٢ - الطاقة المتوافرة (Capital) على سطح الأرض أو في باطن الأرض . تعد الطاقة الكيميائية المتوافرة في وقود المستحاثات (نפט وغاز طبيعي وفحم حجري) - والتي يتم تحريرها في تفاعل كيميائي (احتراق) - المصدر الرئيس من مصادر الطاقة المتوافرة، يليها في الأهمية الطاقة النووية التي يتم

تحريرها نتيجة لتفاعل نووي يتحول فيه جزء من كتلة الأنوية المتفاعلة إلى طاقة حسب معادلة اينشتاين (Einstein) .

وتعتبر الطاقة الحرارية الجوفية (Geothermal energy) إحدى المصادر الهامة والرئيسية من مصادر الطاقة المتوفرة، وتوجد هذه الطاقة في مصائد تحت وفي القشرة الأرضية الصلبة على شكل بخار وماء حار وصخور حارة .

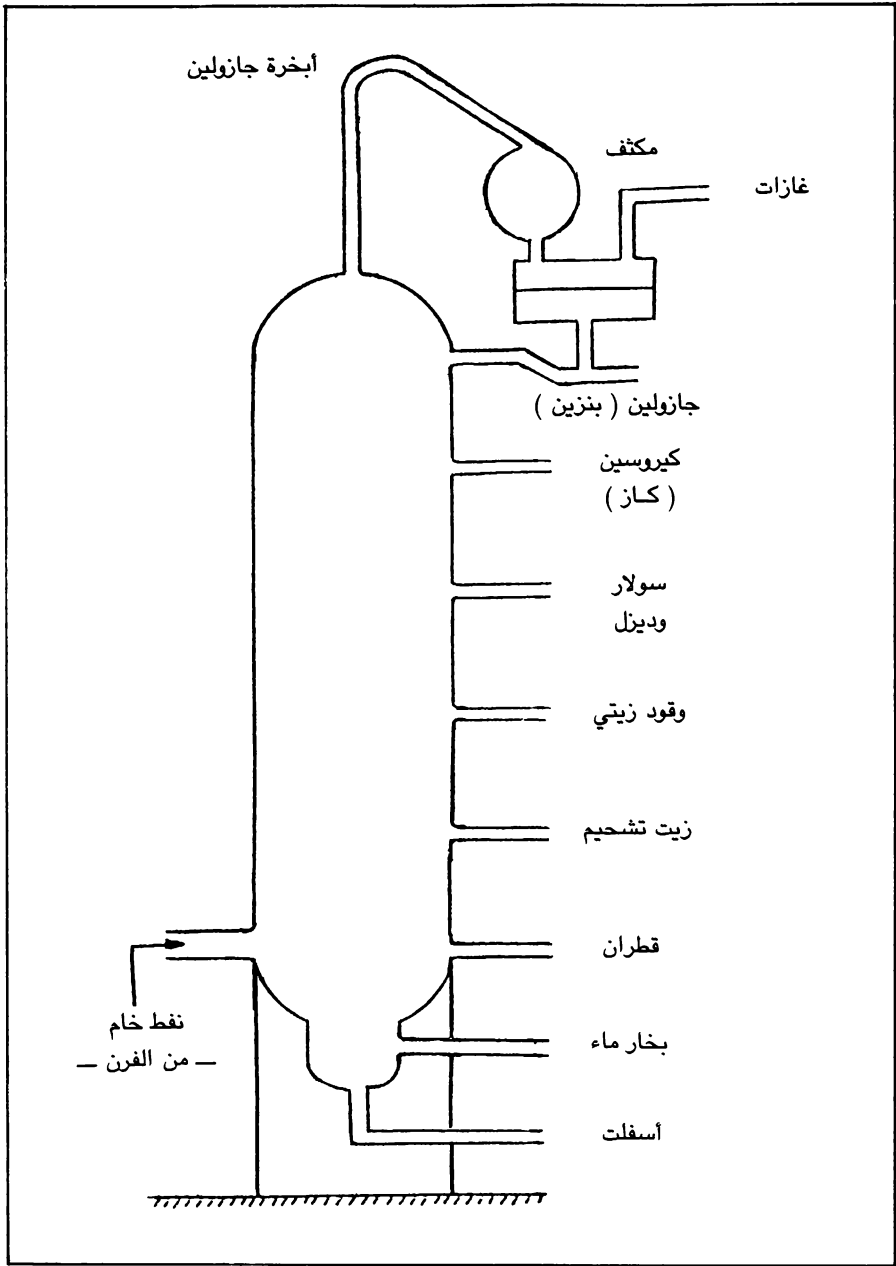
١ - ٦ - ٢ وقود المستحاثات : (Fossil fuels)

يمكن تصنيف وقود المستحاثات عموماً إلى ثلاث فئات رئيسية، هي الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي، وهناك أنواع أخرى من وقود المستحاثات أقل أهمية من هذه الفئات الرئيسية مثل الزيت الصخري (Shale oil) ورمال القار الزيتي (Tar-sand oil) . وجميع هذه الأصناف نتجت عن تحجر (Fossilization) المركبات الهيدروكربونية ذات الصيغة الكيميائية العامة $C_x (H_2O)_y$ والتي تكونت أساساً في عملية التركيب أو التمثيل الضوئي (Photosynthesis) في النباتات حيث تحولت الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية .

يسود الاعتقاد بأن معظم وقود المستحاثات تكونت قبل حوالي ٣٢٥ مليون سنة من كربوهيدرات النباتات الميتة التي تحولت بفعل الضغط والحرارة وغياب الأكسجين إلى مركبات هيدروكربونية لها الصيغة الكيميائية العامة $C_x H_x$ ، ولهذا السبب فإن جميع وقود المستحاثات تتكون من مركبات هيدروكربونية ، بشكل أساسي .

١ — النفط : (Petroleum)

هناك نظريتان تفسران تكون البترول في باطن الأرض، هما النظرية العضوية والنظرية اللاعضوية. ويرى أصحاب النظرية الأولى أن النفط عبارة عن مواد هيدروكربونية مزيجة نتجت عن تحلل مواد عضوية نباتية أو حيوانية بفعل الضغط والحرارة في باطن الأرض. وأغلب هؤلاء يرون بأن النفط يعود إلى تحلل بقايا كائنات بحرية مثل الجمبري والاسكابوريا والقشريات والصدفيات والمحاريات، والأقلية الباقية ترى أن النفط هو بقايا كائنات عضوية نباتية مختلفة . أما أصحاب النظرية



الشكل (١ - ٦)
برج تقطير النفط الخام

اللاعضوية فإنهم يرون أن النفط عبارة عن مواد هيدروكربونية نتجت عن تفاعل مركب كربيد الحديد (أحد مكونات القشرة الأرضية) مع بخار الماء حيث أدى هذا التفاعل إلى تكون مادة شبيهة بالاستيلين تحولت إلى نפט خام بمرور الزمن .

يؤيد أغلب المختصين النظرية العضوية الحيوانية ويوردون أدلة على صحة اعتقادهم مثل احتواء النفط على مادتي النيتروجين والبادافين واللوتين لا توجدان إلا في بقايا الكائنات الحية النباتية والحيوانية .

يوجد النفط في فراغات (فجوات) ضخمة في الصخور الرسوبية. ويصنف النفط الخام عادةً إلى ثلاث فئات بالاعتماد على ما يتبقى منه بعد تقطير المركبات الخفيفة، هي النفط الخام ذو القاعدة البارافينية (Paraffin - based crudes) والنفط الخام ذو القاعدة الاسفلتية (Asphalt - based crudes) والنفط الخام ذو القاعدة المختلطة . يتكون النفط الخام من نسب وزنية متفاوتة لعدة عناصر هي الكربون (٨٤ — ٨٧ ٪) والهيدروجين (١١ — ١٦ ٪) والأكسجين والنيتروجين (صفر — ٧ ٪) والكبريت (صفر — ٤ ٪) .

على الرغم من اكتشاف البترول منذ زمن طويل — ١٨٥٩م — إلا أن إبراج التقطير لفصل مكوّنات البترول عن بعضها لم تُستعمل إلا في بداية هذا القرن . وتعتمد عملية التقطير الجزئي للنفط أساساً على أنه مزيج من عدد كبير من مركبات هيدروكربونية ذات نقاط غليان مختلفة يمكن فصلها بعضها عن بعض باختلاف درجات الحرارة، حيث يمكن الحصول على المواد ذات القابلية الأعلى للتطاير عند درجات حرارة منخفضة أكثر ، مما يؤدي إلى انفصال المركبات المختلفة للنفط عن بعضها في برج التقطير — كما هو مبين في الشكل (١ - ٦) — حسب درجات الحرارة التي تزداد كلما اتجهنا إلى الأسفل .

يعتبر الجازولين (البنزين) من أهم المنتجات النفطية اللازمة لوسائط النقل المختلفة . ولهذا تم تطوير طرق جديدة لزيادة نسبة الجازولين المستخرجة من النفط الخام عن النسبة الطبيعية الموجودة والبالغة ٢٠ ٪ من وزنه . من هذه الطرق ما يسمى بطريقة التكسير وفيها تنحلّ الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات أخرى أصغر وأخف ، وبذلك يمكن إنتاج الجازولين من الكيروسين (الكاز) والوقود الزيتي (Fuel oil) وقد تتم هذه العملية بفعل الضغط والحرارة وتسمى بالتحلل الحراري (Pyrolysis) أو بفعل العوامل المساعدة (Catalytic cracking) حيث أمكن بذلك زيادة نسبة الجازولين المنتجة من النفط الخام إلى ٤٥ ٪ .

يحتل النفط في وقتنا الحاضر المرتبة الأولى من بين مصادر الطاقة الأخرى في العالم من حيث نسبة الاستهلاك. وتتزايد هذه النسبة بمعدل أكبر من غيرها كما هو مبين في الجدول (١ - ٤) .

مصدر الطاقة	نسبة مساهمة المصدر من إجمالي مصادر الطاقة %		
	١٩٧٣	١٩٧٥	١٩٧٨
نفط	٤٥,٨	٤٣,٩	٤٤
غاز طبيعي	١٧,٨	١٨	١٨
فحم حجري	٣٠,٤	٣٠,٧	٣٠
طاقة كهرومائية	٥,٢	٥,٩	٦,٤
طاقة نووية	٠,٩	١,٥	١,٦
المجموع	١٠٠	١٠٠	١٠٠

الجدول (١ - ٤)
تطور الأهمية النسبية لاستهلاك مصادر الطاقة عالمياً

من أهم نواحي استعمالات النفط ما يلي :

- ١ — استخدام الكيروسين (الكاز) في عمليات التسخين المنزلية والطهو والإضاءة واستعمال الافتور والافتاج في محركات الطائرات النفاثة .
- ٢ — استخدام الجازولين (Gasoline) في محركات السيارات .
- ٣ — استخدام الديزل (Diesel) والوقود الزيتي (Fuel - oil) في القطارات والبواخر والمصانع ..
- ٤ — استخدام مختلف مركبات النفط في الآلات الزراعية .
- ٥ — استخدام النفط في صناعات الورق والمنسوجات والمطاط الصناعي والألياف الصناعية والمفرقات، بالإضافة إلى بعض الصناعات الغذائية، واستخدامه لاستخلاص بعض المبيدات الكيميائية، وكذلك استخلاص زيوت التشحيم ومادة الفازلين المستعملة في صناعات المستحضرات الطبية ومستحضرات التجميل. ويستخلص منه أيضاً

شمع البارافين الذي تصنع منه الشموع ، بالإضافة إلى استخلاص الجليسرين والأسيتون والكحول الميثيلي من الغازات الناتجة عن عملية التقطير .

٦ — نحصل من النفط على مادة الإسفلت المستخدمة في تعبيد الطرق .

للنفط خصائص عديدة من أهمها القيمة الحرارية والجاذبية النوعية ونقطة الوميض (Flash point) ونقطة الانصهار (Pour point) ، وتقاس القيمة الحرارية أو المحتوى الحراري بوحدة (KJ / kg) . وتعرف الجاذبية النوعية للسائل بأنها كثافة هذا السائل مقسومة على كثافة الماء عند درجة حرارة ١٥,٦° س (س = درجة مئوية) .

وتعرف نقطة الوميض للوقود السائل بأنها أقل درجة حرارة للسائل يكون عندها بخار الوقود المتولد فوق سطح السائل قابلاً للاشتعال (Will Just ignite) وعند درجة حرارة أعلى منها بقليل (تسمى نقطة الاشتعال Fire point) فإن بخار الوقود المتولد يشتعل وتبدأ عملية الاحتراق للوقود . وتعرف نقطة الانصهار لحدى مشتقات النفط بأنها أقل درجة حرارة للمشتقة النفطية تبدأ عندها عملية السيالان (Flow) لهذه المشتقة .

يمتاز النفط عن الفحم الحجري بأنه أسهل في المناولة (Handling) والخبز والنقل وأسهل في عملية الحرق ولا يخلف احتراقه سوى كمية قليلة من الرماد مقارنة بالفحم الحجري ، وهناك بعض المشاكل في عملية حرق النفط ، فعلى الرغم من أن نسبة الكبريت قليلة إلا أن عملية التخلص منها صعبة . وهناك أنواع من النفط الخام ذات محتوى لا بأس به من الكبريت والتي تُنتج أكاسيد الكبريت الملوثة للجو عند حرقها ، بالإضافة إلى تفاعل هذه الأكاسيد مع بخار الماء لإنتاج حامض الكبريتيك الذي يؤدي إلى تآكل واهتراء المواد الحديدية كما هو الحال في عوادم السيارات . وهناك أيضاً مشكلة احتواء بعض الأنواع على عنصر الفاناديوم (V_a) الذي ينتج أكاسيد الفاناديوم خلال الاحتراق ومن ضمنها خامس أكسيد الفاناديوم ($V_a O_5$) الذي يتسبب في حدوث تآكل سريع . للمواد الحديدية الموجودة في معظم المراحل .

بلغ الاحتياطي العالمي المؤكد (المعروف) من النفط لعام ١٩٧٩م حوالي ٦٤٢ بليون برميل ، تساهم دول الأوبك بحوالي ٣٤٢ بليون برميل من هذا

الاحتياطي، وقد قدر احتياطي المملكة العربية السعودية لوحدها عام ١٩٧٩م بحوالي ٣٠٠ بليون برميل أي ما يعادل حوالي ٤٦,٧ ٪ من الاحتياطي العالمي، في حين يزيد الاحتياطي العربي الكلي عن ٦٠ ٪ من الاحتياطي العالمي .

٢ — الفحم الحجري (Coal)

يُعتقد أن الفحم الحجري يعود لأصل نباتي حيث لزمّت طبقة من المواد النباتية سمكها عشرون قدماً لتكوين طبقة من الفحم الحجري سمكها قدم واحد . ولقد تحولت هذه البقايا النباتية بغياب الهواء وتحت التأثير المشترك للضغط ودرجة الحرارة المرتفعين في باطن الأرض إلى مادة الخث (Peat) التي هي عبارة عن وقود من درجة واطئة (Low - grade fuel) ، ومن ثم تحولت هذه المادة إلى الفحم الحجري البني (Brown coal) ، ثم إلى فحم اللجنائيت (Lignite) ، ثم إلى الفحم شبه القاري (Subbituminous) ، ثم إلى الفحم القاري (Bituminous) ، وأخيراً إلى فحم الأنثراسايت (Anthracite coal) .

وقد رافق عمليات التحول هذه زيادة في صلابة الفحم ونقص في محتواه من الأكسجين والهيدروجين والرطوبة وزيادة في محتواه من الكربون .

يوجد الفحم الحجري على شكل طبقات (Seams) في القشرة الأرضية . وهناك تباين كبير في سماكات هذه الطبقات والتي تقل في بعض المناطق عن ٣٠ سنتمتراً في حين تصل في بعض المناطق إلى حوالي ١٣٠ متراً كما هو الحال في فوشون (Fushun) بمنشوريا (Manchuria) ، ويصنف الفحم الحجري بعدة طرق منها طريقة الجمعية الأميركية لفحص المواد (ASTM) التي تصنف الفحم إلى أربع فئات رئيسة تبعاً لعمرها — زمن تكونها — وهذه الفئات هي :

١ — الفحم الأنثراسيטי : (Anthracitic)

ويعرف أيضاً بالفحم الصلب، إذ انه أكثر أنواع الفحم صلابة وجودة، ودرجة الاشتعال لهذا الفحم مرتفعة، وعند احتراقه فإنه لا يخلف سوى القليل من الرماد ويتميز بلونه الأسود الغامق ، ويوجد هذا الفحم عادةً على عمق كبير، ولهذا فإن تكاليف استخراجه عالية. ولا يستعمل هذا الفحم في الصناعة إلا على نطاق محدود لأنه أقل أنواع الفحم توافراً. وينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات :

(١) الميتا انثراسايت (Meta Anthracite) تبلغ نسبة الكربون فيه ٩٨ ٪ أو أكثر، بينما تبلغ نسبة المواد المتطايرة (Volatile matter) فيه ٢ ٪ أو أقل، وهذا النوع لا يتكتل (Non agglomerating) .

(ب) الأنثراسايت (Anthracite) تتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٩٢ — ٩٨ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ٢ — ٨ ٪، وهذا النوع لا يتكتل .

(ج) شبه الأنثراسايت (Semianthracite) تتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٨٦ — ٩٢ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ٨ — ١٤ ٪ وهو لا يتكتل أيضاً .

٢ — الفحم القاري (الببتوميني) : (Bituminous)

أكثر أنواع الفحم انتشاراً ويعرف أيضاً بالفحم اللين (Soft)، وهو سهل الاحتراق ويعطي لهباً أصفر اللون عند حرقه. ولون هذا الفحم أسود ولا يتشقق عند تعرضه للهواء. ينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لنسبة الكربون الموجودة فيه — جميعها لا تتكتل في العادة — :

(١) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة المنخفضة، وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٧٨ — ٨٦ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ١٤ — ٢٢ ٪

(ب) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة المتوسطة، وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٦٩ — ٧٨ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ٢٢ — ٣١ ٪

(ج) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة العالية، تبلغ نسبة الكربون فيه ٦٩ ٪ أو أقل، في حين تبلغ نسبة المواد المتطايرة ٣١ ٪ أو أقل ، وتتراوح قيمته الحرارية بين ٢٤٤٠٠ — ٣٢٦٠٠ كيلوجول / كغم. وتنقسم هذه المجموعة أيضاً إلى ثلاث مجموعات إضافية حسب القيم الحرارية للفحم .

٣ — الفحم شبه القاري : (Subbituminous)

في حين يستخدم الفحم القاري في صناعة الحديد والصلب وذلك بعد تحويله إلى فحم الكوك — الذي يعتبر المصدر الرئيس للحرارة اللازمة لصهر المعادن — فإن الفحم شبه القاري — الذي يمكن اعتباره نوعاً سيئاً من الفحم القاري — يستخدم في إنتاج الغازات. كما تستخلص من عملية تقطيره مشتقات هامة تدخل في الكثير من الصناعات مثل صناعة الأصباغ والمطاط والأحماض والأسمدة وغيرها . ويقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لقيمها الحرارية. هي الفحم شبه القاري A والفحم شبه القاري B والفحم شبه القاري C. والقيم الحرارية لهذه المجموعات الثلاث على الترتيب تتراوح ما بين (٢٤٤٢٠ — ٢٦٧٥٠) و (٢٢٠٩٠ — ٢٤٤٢٠) و (١٩٣٠٠ — ٢٢٠٩٠) كيلوجول / كغم.

٤ — فحم الليجنات : (Lignite)

ويسمى أيضاً الفحم الأسمر، وهو من الأنواع الصلبة وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٦٠ — ٧٥ ٪ ويعطي عند حرقه نسب عالية من الدخان والشوائب المتطايرة ، وهو ذو قيمة أو محتوى حراري منخفض مقارنة بالأنواع الأخرى. لذلك فإنه يعتبر من الأنواع الرديئة ذات الاستعمال المحدود. وينقسم هذا النوع إلى مجموعتين ثانويتين تبعاً للقيمة الحرارية وهي: فحم الليجنات A الذي تتراوح قيمته الحرارية ما بين ١٤٦٥٠ — ١٩٣٠٠ كيلوجول / كغم وفحم الليجنات B الذي تقل قيمته الحرارية عن ١٤٦٥٠ كيلوجول / كغم .

طرق تحليل الفحم (Coal analyses)

هناك طريقتان أساسيتان تستعملان لتحليل الفحم الحجري وكلا الطريقتين تعطيان النسب الكتلية (الوزنية) لمكونات الفحم بعد استبعاد محتوياته من الرطوبة (فحم جاف Moisture - free) والرماد (Ash - free) وهما التحليل التقريبي والتحليل النهائي ، ولكنه يلزم تحويل هذه التحليلات لكي تشمل نسب الرطوبة والرماد عند إجراء حسابات الاحتراق والمناولة للفحم. وتسمى التحليلات الناتجة عن عملية التحويل هذه بتحليلات الفحم عند الحرق (As - burned) وعند الاستلام (As - received) .

١ — التحليل التقريبي : (Proximale analysis)

تعتبر هذه الطريقة أبسط طريقة لتحليل الفحم وهي تعطي النسب الكتلية لكل من الكربون الثابت (FC) والمادة المتطايرة (VM) والرطوبة (M) والرماد (A) في الفحم . يتم هذا التحليل بأخذ عينة من الفحم المسحوق وتوزن بعناية وتسخن إلى درجة حرارة ١١٠° س لمدة ٢٠ دقيقة ، ثم يُعاد توزين العينة فتكون نسبة الكتلة للرطوبة هي النقص في الوزن بعد التسخين مقسوماً على الوزن الأصلي . ويسخن ما تبقى من العينة إلى درجة حرارة ٩٥٤° س في وعاء مغلق لمدة سبع دقائق وتوزن العينة في نهاية هذه المدة، فتكون نسبة الكتلة للمادة المتطايرة مساوية للنقص في الوزن مقسوماً على الوزن الأصلي ، وأخيراً يتم تسخين العينة إلى درجة حرارة ٧٣٢° س في بوتقة مفتوحة حتى تحترق تماماً ، ثم يتم بعد ذلك توزيع ما تبقى من العينة، فتكون نسبة الرماد في العينة مساوية للوزن النهائي مقسوماً على الوزن الأصلي . ويمكن حساب نسبة الكربون الثابت في العينة بطرح نسب كل من الرطوبة والمادة المتطايرة والرماد من الواحد الصحيح . وبالإضافة إلى نسب الكربون الثابت والمادة المتطايرة والرطوبة والرماد فإن التحليل التقريبي يعطي أيضاً النسبة الكتلية للكبريت (S) والقيمة الحرارية العليا (HHV) للفحم بشكل منفصل .

٢ — التحليل النهائي : (Ultimate analysis)

وهذا التحليل هو تحليل مخبري ويعطي نسب الكتلة لكل من الكربون (C) والهيدروجين (H₂) والأكسجين (O₂) والكبريت (S) والنيتروجين (N₂) في الفحم مع القيمة الحرارية العليا للفحم . ومعظم التحليلات النهائية تبين نسب الرماد والرطوبة بشكل منفصل ولكن بعضها يدمج هذه النسب مع نسب الأكسجين والهيدروجين . تستعمل نتائج التحليل النهائي في حساب كمية الهواء المطلوبة لنظام احتراق معين وبالتالي تحديد حجم نظام السحب أو الشفط للفرن .

خصائص الفحم الحجري :

هناك عدد من الخصائص أو الصفات التي يجب مراعاتها عند اختيار نوع معين من الفحم في تطبيق عملي معين أهمها :

١ — محتواه من الكبريت :

يعتبر الكبريت أحد العناصر القابلة للاحتراق في الفحم الحجري، وينتج عن احتراقه غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) الذي يعتبر أحد الملوثات الرئيسية للبيئة . وتعد عملية إزالة الكبريت من الفحم قبل حرقه عملية صعبة ومكلفة. كذلك فإن عملية إزالة ثاني أكسيد الكبريت من نواتج الاحتراق تعد هي الأخرى عملية صعبة، ولهذا فإنه من الضروري أن يكون المحتوى الكبريتي أقل ما يمكن (١ ٪ أو أقل) .

٢ — خصائص احتراقه :

عند اختيار نوع من الفحم لنظام احتراق معين فإنه يجب مراعاة الكيفية التي يتم فيها إحراق هذا الفحم ، فإذا كان حرق الفحم يتم على فرش ثابت فإنه يجب استعمال فحم قابل للاحتراق الحر (Free-burning coal) وليس فحماً قابلاً للتكتل (Caking coal) ، لأن فحم الاحتراق الحر يميل للتبعثر والتناثر عند اشتعاله مما يؤدي إلى تعريض الفحم غير المشتعل لهواء الاحتراق فيؤدي إلى تسهيل وتسريع عملية الاحتراق ، ولكن في حالة حرق الفحم القابل للتكتل فإن ذلك يؤدي إلى اندماج الفحم المحترق في كتلة واحدة وهذا بدوره يتسبب في عدم احتراق نسبة كبيرة من الكربون الثابت في الفحم ، ومثل هذا النوع من الفحم يستخدم عادة لإنتاج فحم الكوك (Coke) ، ولحرقه بكفاءة يستخدم فرش يمكن تحريكه أو هزّه ميكانيكياً لتحطيم وتكسير الفحم المتكتل .

٣ — مقاومته لظروف الطقس : (Weatherability)

تحدد هذه الخاصية مقدرة الفحم على مقاومة ظروف الطقس المتغيرة وذلك من خلال عدم حدوث تفتت زائد للفحم عند تعرضه لمثل هذه الظروف . في محطات التوليد الكبيرة التي تعمل بالفحم الحجري يتم تخزين الفحم في أكوام كبيرة بجانب هذه المحطات حيث انه عند وصول الفحم إلى أماكن التخزين هذه — بواسطة القطارات أو غيرها من وسائل النقل — فإنه يتم نشره على شكل طبقات رقيقة ورصّه بواسطة آلات ضخمة للتخلص من أكبر كمية ممكنة من الهواء الموجود في أكوام الفحم للتقليل من خطر حدوث الاشتعال الذاتي في هذه الأكوام. وإذا كان الفحم قابلاً للتفتت بسهولة فإن هذا يؤدي إلى تآكل أو تحاّث الجزيئات الصغيرة بفعل العواصف المطرية مما يتسبب في خسائر مادية وفوائد طاقة كبيرة بالإضافة إلى تلوث المياه .

٤ — قابليته للطحن : (Grindability)

يستخدم الفحم المطحون في الكثير من أنظمة حرق الفحم الحجري خصوصاً أفران الفحم المسحوق حيث يتم طحن الفحم للحصول على مسحوق فائق النعومة بواسطة آلات طحن خاصة (Pulverizers) تتناقص قدرتها بازدياد قابلية الفحم للطحن .

٥ — درجة حرارة تليين الرماد : (Ash-softening temperature)

هي درجة الحرارة التي يصبح عندها رماد الفحم ذا درجة عالية من اللدانة (Very plastic) وهذه الدرجة تقل قليلاً عن درجة حرارة انصهار الرماد . في الأفران التي يتم التخلص من الرماد فيها على شكل جُفاء (Slag) مُنصهر ، يُفضل أن يكون الرماد ذا درجة حرارة تليين منخفضة في حين يفضل استخدام الرماد ذي درجة حرارة التليين المرتفعة في أنظمة الاحتراق التي تتعامل مع الرماد كمادة صلبة .

٦ — القيمة (المحتوى) الحرارية : (Heating value)

تُعد هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة إذ انها تمثل مقدار الطاقة الكيميائية المخزنة في كتلة أو حجم معين من الوقود (الفحم) ، وتقاس عادة بوحدات الكيلوجول لكل كيلوغرام (KJ / kg) . هناك قيمتان حراريتان للفحم هما: القيمة الحرارية العليا أو الإجمالية (HHV) والقيمة الحرارية الدنيا أو الصافية (LHV) ، والفرق بين القيمتين هو الحرارة الكامنة للتبخّر الموجودة في بخار الماء المطرود مع الغازات العادمة والناتج عن عملية الاحتراق بالإضافة للماء (الرطوبة) الموجود في الفحم أصلاً (قبل حرقه) ويستثنى من ذلك أي رطوبة قد تدخل مع هواء الاحتراق .

وحيث ان الحرارة الكامنة لتبخّر الماء تبلغ حوالى ٢٤٠٠ كيلوجول / كغم فإنه يمكن حساب إحدى القيمتين من الأخرى بواسطة المعادلة التقريبية (يمكن استعمالها لأي وقود آخر غير الفحم) الآتية :

$$HHV - LHV = 2400 (M + 9 H_2) \text{ KJ / kg} \quad (٧ - ١)$$

حيث ان (M) و (H₂) هما النسب الوزنية للرطوبة والهيدروجين في الوقود .

٣ — الغاز الطبيعي : (Natural Gas)

يعتبر الغاز الطبيعي من أهم مصادر الوقود الغازي ويوجد في الطبيعة تحت سطح الأرض إما مختلطاً مع النفط أو منفرداً بالقرب من حقول النفط أو منفرداً بعيداً عن حقول النفط أو داخل طبقات الفحم الحجري في مكامن داخل الطبقات الصخرية. ويتراوح ضغط الغاز الطبيعي في مكامن وجوده ما بين ٢٥٠ — ٧٠٠ بار ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N / m}^2$) .

يتكون الغاز الطبيعي من خليط من المركبات الغازية ، أهمها : الميثان (Methane CH_4) بنسبة تتراوح ما بين ٧٠ — ٩٥ ٪ ، والإيثان (Ethane $\text{C}_2 \text{H}_6$) بنسبة تصل إلى حوالي ١٢ ٪ ، والبروبان (Propane $\text{C}_3 \text{H}_8$) والبيوتان (Butane $\text{C}_4 \text{H}_{10}$) بنسب أقل .

للغاز الطبيعي عدة ميزات تجعل منه مصدراً هاماً من مصادر الطاقة من أبرزها :

١ — قيمته الحرارية العالية والبالغة حوالي ٥٥٨٠٠ كيلوجول / كغم (٣٧٠٠٠ كيلوجول / متر مكعب عند ضغط جوي ١ ودرجة حرارة ٢٠°س) .

٢ — سهولة حرقه واختلاطه مع الهواء بشكل جيد .

٣ — يعطي احتراقاً كاملاً ونظيفاً مع القليل من الرماد .

٤ — سهولة استعماله ونقله حيث يمكن إيصاله للبيوت في أنابيب لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية. كذلك بالإمكان نقله في أنابيب عبر البحار أو شحنه في ناقلات مبردة (Cryogenic) بعد إسالته وتحويله إلى غاز طبيعي مسال (LNG) عند درجة حرارة — ١٢٧°س) .

العيب الوحيد للغاز الطبيعي كمصدر للطاقة هو أنه من الصعب تخزينه بكميات كبيرة بحالته الغازية. وهناك بعض الشركات التي تقوم بحقن الغاز تحت ضغوط عالية في فجوات ضخمة تحت الأرض حيث يحل هذا الغاز محل الماء الموجود في هذه الفجوات .

هناك عدد كبير من الغازات المصنعة ، منها : غاز النفط المسال

(Liquified petroleum gas, LPG) ويطلق عليه أحياناً اسم غاز المصفاة . ويتكون هذا الغاز من المركبات الخفيفة الناتجة في برج تقطير النفط وهي البروبان (Propane) والبيوتان (Butane) بشكل أساسي . وهذا الغاز يعتبر ذا قيمة حرارية حجمية أعلى من القيمة الحرارية الحجمية للغاز الطبيعي وذلك لأن الوزن الجزيئي والكثافة له أكبر . وغاز النفط المسال له كثافة أكبر من تلك التي للهواء الجوي مما يزيد من خطورة مناولته بالمقارنة مع الغاز الطبيعي .

ويتم عادة نقل هذا الغاز وتخزينه تحت ضغوط تتراوح ما بين ٤ — ٢٠ بار وذلك حسب درجة حرارة الجو . ومن الغازات المصنعة أيضاً غاز الماء (Water gas) والذي يتم إنتاجه بتمرير كل من بخار الماء والهواء بالتناوب خلال فرش من فحم الكوك المتوهج حيث يتفاعل البخار مع فحم الكوك وينتج عن هذا التفاعل غاز الهيدروجين وغاز أول أكسيد الكربون .

وتضاف أحياناً أبخرة بعض الزيوت إلى غاز الماء لرفع قيمته الحرارية ويسمى غاز الوقود الناتج عن هذه العملية بـغاز الماء الممزوج (Carbureted water gas) .

وهناك عدد من العمليات التحويلية التي يتم تطويرها لتصنيع وقود غازي ذي قيمة حرارية عالية من الفحم الحجري، وهذا الغاز يطلق عليه اسم الغاز الطبيعي المصنع (Synthetic natural gas SNG) . نظرياً ، فإن هذه العمليات تجعل من الممكن الاستفادة من الفحم الحجري ذي المحتوى العالي من الكبريت وذلك بتحويل معظم طاقته إلى وقود غازي رخيص ونظيف، ولكنه يلزم إضافة الهيدروجين إلى الفحم قبل عمليات التحويل هذه لأن المركبات الهيدروكربونية الصلبة الموجودة في الفحم تعتبر ذات نسبة هيدروجين / كربون منخفضة مقارنة مع هذه النسبة للوقود الغازي . وفي عملية الهدرجة (Hydrogenation) يتفاعل الهيدروجين عالي الضغط بدرجة حرارة ٩٠٠° س مع الفحم لإنتاج عدد من المركبات الهيدروكربونية الخفيفة خصوصاً الميثان .

ومن الغازات المصنعة كذلك غاز المنتج (Producer gas) ويتم تحضير هذا الغاز بحرق طبقات بعض أنواع الفحم الحجري (من درجة واطئة Low-grade coal) في الأرض أو في مواقع وجودها مع كمية غير كافية من الهواء إلى أن يحترق جميع الفحم تماماً .

وفي هذا الاحتراق تضاف كمية من الهواء تكفي فقط للمحافظة على درجة حرارة الاحتراق عند حد معين كافٍ لسحب بعض الهيدروجين وأكسدة بعض الكربون إلى أول أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أن الوقود الغازي الناتج عن هذه العملية ذو جودة منخفضة إلا أنه يعتبر استثماراً جيداً لهذه الطبقات الرديئة والقليلة السمك من الفحم الحجري التي تعد عملية استخراجها غير مجدية من الناحية الاقتصادية .

وهناك غاز الفرن العالي (Blast-furnace gas) منخفض الجودة والذي هو عبارة عن ناتج ثانوي في عمليات تصنيع الفولاذ ، ويتم إنتاج هذا الغاز بواسطة حرق الفحم في هواء غير كافٍ ثم يمرر الغاز المتولد فوق المعدن المنصهر لمنع حدوث تأكسد لهذا المعدن (يكون هذا الغاز عبارة عن عامل مختزل Reducing agent) .

وعلى الرغم من أن القيمة الحرارية لغاز الفرن العالي لا تتعدى عشر هذه القيمة للغاز الطبيعي فإنه يتم إنتاج كميات كبيرة منه في هذه الأفران بشكل اقتصادي .

ويتكون هذا الغاز بشكل أساسي من النيتروجين وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون، حيث أن أول أكسيد الكربون هو المكون الوحيد القابل للاحتراق في هذا الغاز .

وأخيراً هناك غاز المجاري (Sewage gas) الذي ينصب الاهتمام حالياً على إنتاجه بالاستفادة من مخلفات الحيوانات والخضروات. ويتكون هذا الغاز أساساً من الميثان المتولد خلال عملية تحلل (Decay) المواد العضوية .

ازدادت أهمية الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة حيث ازدادت نسبة ما ساهم به هذا الغاز عام ١٩٥٠م من ١٢٪ من طاقة العالم الكلية إلى حوالى ١٩٪ عام ١٩٨٠ .

يتراوح الاحتياطي العالمي المؤكد من الغاز الطبيعي حسب التقديرات في نهاية عام ١٩٧٥م ما بين $١٢١٠ \times ٥٨ - ١٢١٠ \times ٧١$ متر مكعب ، شُكِّل الاحتياطي العربي حوالى ١٦,٥٪ منه .

١ - ٦ - ٣ الطاقة الجيوفيزيائية :

١ - الطاقة المائية:

تشمل هذه الطاقة كلاً من الطاقة الكهرومائية وطاقة الأمواج، ويمكن الحصول على الطاقة الكهرومائية باستغلال القوة الكامنة في مساقط المياه الطبيعية (الشلالات) أو الصناعية مثل السدود ، وللطاقة المتوافرة من هذا المصدر ميزات منها :

١ - إنها طاقة متجددة وليست معرضة للفناء طالما هناك أمطار وتلوج تتساقط بانتظام .

٢ - إن الطاقة الكهربائية المتولدة من قوة اندفاع المياه تمتاز بما يلي :

(أ) سهولة التحكم بها حسب الحاجة .

(ب) سرعة النقل والتوزيع .

(ج) نظافتها المطلقة (لا تلوث البيئة) .

(د) الكفاءة العالية في تحويلها من طاقة وضع إلى طاقة كهربائية حيث تصل هذه الكفاءة إلى حوالي ٩٠ ٪ .

(هـ) المحطات الكهرومائية تعمر طويلاً (يصل عمرها إلى ٢٠٠ سنة) .
وحاجتها للصيانة قليلة وذلك لقلّة الأعطال في ألتها ولا تحتاج لعدد كبير من الأيدي العاملة للإشراف عليها وصيانتها بالإضافة إلى أن هذه المحطات تخدم أغراضاً أخرى غير إنتاج الطاقة الكهربائية مثل توفير مياه الري والمياه اللازمة لتربية الأسماك .

وهناك سيئات منها :

(أ) تكاليف الإنشاء الباهظة (السدود وخطوط نقل الكهرباء ...) .

(ب) الكهرباء غير قابلة للتخزين بشكل اقتصادي .

(ج) لا يمكن نقل الكهرباء مسافة تزيد عن ١٠٠٠ كم بشكل اقتصادي .

أما طاقة الأمواج، فهي غير مستغلة وهناك بعض البحوث والمقترحات لاستغلال هذه الطاقة ، حيث جرى استخدام فكرتين : الأولى

تستخدم الحركة الرأسية للأمواج وتسمى بالأنبوب الغاطس، حيث يتم استخدام أنبوب يغطس ٧٥ ٪ من طوله في الماء وهناك صمامات تسمح بإدخال الماء من أسفل الأنبوب ثم تغلق، وخلال حركة الماء للأعلى في الأنبوب يمر خلال توربينات تولد الطاقة الكهربائية ثم يخرج الماء من فتحة تكون خارج سطح الماء وتعتمد قوة سير الماء وبالتالي الطاقة الكهربائية المتولدة على قوة الأمواج . أما الفكرة الثانية فإنها تستغل حركة الاهتزاز التي تولدها الأمواج باستخدام نوع من البندول أو العوامة حيث يستفاد من الحركة الترددية للذراع المتصلة بهذه العوامة وذلك بتحويلها إلى شكل مفيد من أشكال الطاقة . وتقدر الطاقة التي يمكن أن تولدها الأمواج في العالم بحوالي 6×10^{10} واط .

وهناك أيضاً طريقة أخرى للحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من مياه المحيطات، وذلك بالاستفادة من الاختلاف في درجات الحرارة على أعماق مختلفة في هذه المحيطات حيث انه بالإمكان توليد القدرة بالاستفادة من الحرارة المتوافرة في الطبقات السطحية لمياه المحيط (المصدر الساخن) وطردها الحرارة إلى الطبقات الباردة نسبياً في الأسفل (المصب البارد) .

ويطلق على هذا المصدر المتجدد للطاقة، اسم طاقة المحيط الحرارية (Ocean Thermal Energy OTE) .

٢ - طاقة الرياح : (Wind energy)

استطاع الإنسان تسخير طاقة الرياح منذ أمد بعيد لأغراض مختلفة وقد جرى استخدامها في البحر لتسيير السفن وفي البر لتشغيل الطواحين الهوائية .

تنشأ حركة الرياح من تأثير مزدوج لتسخين أشعة الشمس ودوران الأرض حول نفسها . وتتوافر الطاقة في الرياح على شكل طاقة حركة

$$KE = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 J \quad (١ - ٨)$$

حيث :

KE : طاقة الحركة للرياح (J)

m : كتلة الرياح (kg)

V : سرعة الرياح (m / s)

ح: كثافة الهواء (kg / m^3)

A : المساحة التي تتحرك فيها شفرات المروحة الهوائية (Swept area m^2)

على الرغم من أن الطاقة الكامنة في الريح عظيمة إلا أن هناك سلبيات كثيرة تمنع استغلالها على نطاق واسع أهمها :

١ — التذبذب الكبير في سرعة الرياح مما يؤثر على التوربين (الطاحونة الهوائية) .

٢ — تنصف هذه الطاقة بعدم الديمومة في معظم المناطق .

٣ — لكون كثافة الهواء قليلة فإن هذا يعني أن الطاقة المتوفرة في حجم معين من الهواء قليلة ويتطلب ذلك معدات ذات مساحة وحجم كبيرين لاستخلاص هذه الطاقة .

وتقدر الطاقة المتوفرة في الرياح في العالم بحوالى 970×10^{10} واط .

٣ — الطاقة الشمسية : (Solar energy)

تعتبر الطاقة الشمسية مصدر كل الطاقات التقليدية المعروفة (باستثناء الطاقة النووية) وهي مصدر لا ينضب للطاقة ، وتستقبل الأرض من الشمس كمية من الطاقة مقدارها 1810 كيلواط — ساعة في العام. وهذه الكمية تساوي ألف ضعف احتياطي البترول في العالم. في الوقت الحاضر لا يتم استغلال هذه الطاقة كمصدر أساسي من مصادر الطاقة إلا أن هناك بحوثاً متزايدة للتوسع في استغلالها خصوصاً في توليد الطاقة الميكانيكية. والمشاكل الرئيسة التي تعترض استغلال الطاقة الشمسية بشكل واسع تتلخص فيما يلي :

١ — تعتبر مصدراً متقطعاً للطاقة على المدى اليومي (ليل — نهار) وعلى المدى الفصلي (صيف — شتاء)

٢ — نظراً لانخفاض شدة الإشعاع الشمسي فإن هذا يتطلب لواقط ومجمعات شمسية ذات مساحات وأحجام كبيرة مما يزيد من التكاليف .

٣ — يحتاج استغلالها إلى تكنولوجيا متقدمة لا تتوافر للدول كافة.

٤ — صعوبة تخزين الطاقة الشمسية .

ولكن الميزات العديدة لهذا المصدر من الطاقة يجعلها من المصادر المرغوبة، ومن أهم هذه الميزات:

- ١ — تشكل الطاقة الشمسية مصدراً هائلاً للطاقة المتجددة .
- ٢ — يمكن الاعتماد عليها بسبب ديمومتها واستمراريتها .
- ٣ — مصدر مجاني للطاقة .
- ٤ — مصدر طاقة نقي ونظيف أي أنها لا تلوث البيئة .
- ٥ — إمكانية تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة بسهولة .
- ٦ — تشكل مصدراً مستقلاً للطاقة وليست بحاجة للاستيراد من بلد آخر .

١ - ٦ - ٤ الطاقة الحرارية الجوفية : (Geothermal energy)

توجد هذه الطاقة على شكل تراكبات طبيعية من بخار الماء والماء الحار والصخور الجافة الحارة .

هناك انتقال حرارة طبيعي من قلب الكرة الأرضية المنصهر إلى سطح الكرة الأرضية عبر طبقات الأرض المختلفة، وفعلياً فإن جميع هذه الحرارة تنتقل بالتوصيل ، (Conduction) وفي بعض الأماكن فإن كميات محدودة من الماء أو البخار تنساب إلى سطح الأرض عبر شقوق أو صدوع في طبقات الأرض على شكل نوافير غازية (Fumaroles) أو نوافير حارة (Geysers) أو ينابيع حارة (Hot springs) وثورات بركانية، ولكن مثل هذه الأماكن نادرة الوجود ولهذا فإنه لا بد من حفر الآبار في أغلب الأحيان لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية .

يبلغ الانحدار الطبيعي لدرجة الحرارة (Normal temperature gradient) في التركيب الصخري للأرض حوالي $29^{\circ}\text{C} / \text{Km}$ وانحدار بهذا المقدار يعتبر غير كافٍ للاستغلال العملي للطاقة الداخلية للأرض. وفي بعض الأماكن يصل هذا الانحدار في درجة الحرارة إلى أكثر من $110^{\circ}\text{C} / \text{Km}$ مما يجعل من الممكن استغلال الطاقة الحرارية في هذه الأماكن . الشكلاّن الأساسيان للطاقة الحرارية الجوفية

هما الماء الحار والصخور الحارة الجافة (Hot dry rock) وفي بعض الأماكن تسود الحالة البخارية في منطقة الماء الحار ويعرف مصدر الطاقة في هذه الحالة بالمصدر البخاري (Steam) وإذا كان الماء الحار للمصدر كاملاً في حالته السائلة ، فإن المصدر يسمى بالمصدر الحراري المائي الجوفي (Geohydrothermal) .

تم استغلال الطاقة الحرارية الجوفية منذ فترة طويلة في مناطق مختلفة من العالم كما هو الحال في لارديرلو (Larderello) في إيطاليا حيث حفر هناك بئر لاستغلال البخار الجوفي عام ١٩٠٤م تصل قدرته الكهربائية إلى ٣٧٠ ميغاواط (370 MWe) . يبين الشكل (١ - ٧) رسماً تخطيطياً لنظام طاقة حرارية جوفية .

يعتبر بعض المختصين الطاقة الحرارية الجوفية طاقة ملوثة إلى حد ما حيث أن بعض المصادر تطلق غازات ذات نشاط إشعاعي بالإضافة إلى غاز سولفيد الهيدروجين (H_2S) الذي هو غاز سام .

وهناك مشكلة أخرى مصاحبة لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية وهي مشكلة التلوث الحراري (Thermal pollution) الناتج عن ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للبيئة مما يخل بالتوازن البيئي كما سنرى فيما بعد .

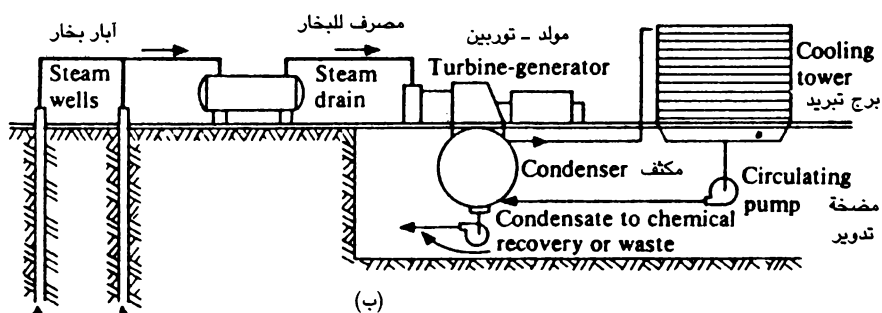
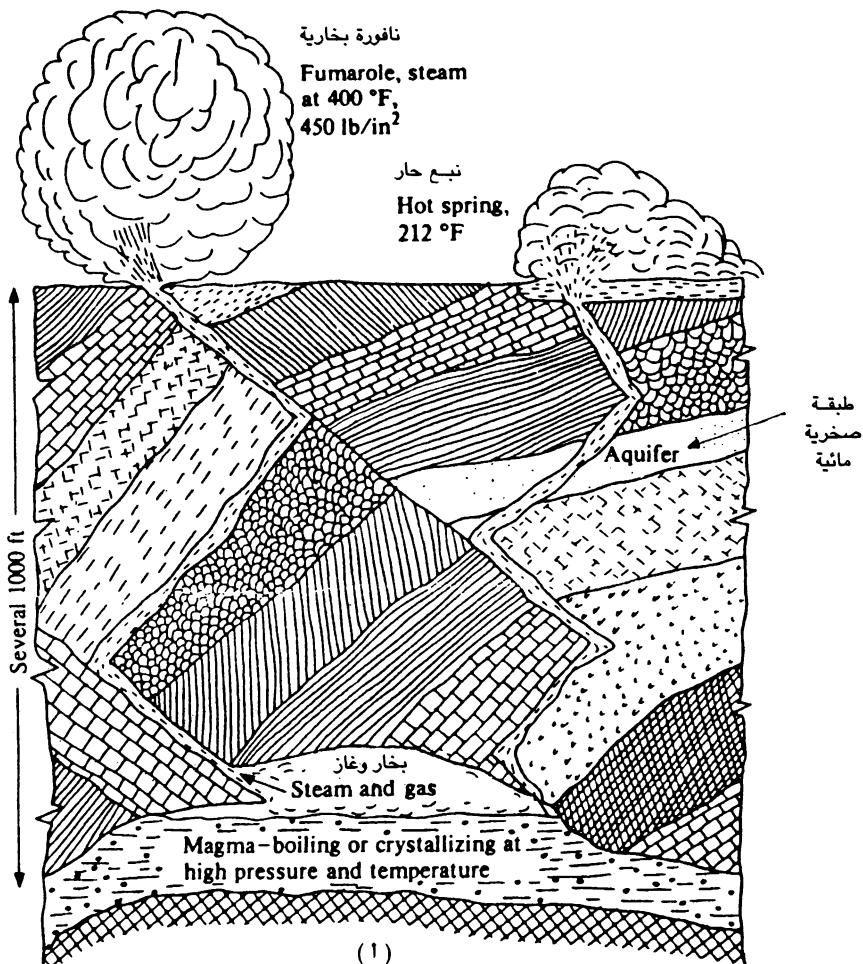
ومن المشاكل الهامة أيضاً لهذا المصدر هي احتمال هبوط الأرض وتصدعها وزيادة النشاط الزلزالي في منطقة استغلال الطاقة الجوفية .

تقدر الطاقة الحرارية الجوفية الكلية التي يمكن استغلالها في العالم بحوالى 4×10^6 جول .

١ - ٦ - ٥ الطاقة النووية : (Nuclear energy)

تعتبر الطاقة النووية المصدر الوحيد من مصادر الطاقة التقليدية التي ليس مصدرها الأساسي الطاقة الشمسية، ويرجع تاريخ اكتشافها إلى أربعة عقود مضت، وتعد مصدراً هائلاً للطاقة إذا تم استغلاله بشكل واسع حيث أن مقدار الطاقة المتولدة من التفاعلات النووية يعطي بمعادلة اينشتاين:

$$E = m c^2 J \quad (١ - ٩)$$



الشكل (١ - ٧)

رسم تخطيطي لتراكم حراري جوفي طبيعي ومحطة قدرة نموذجيين

حيث ان :

E : الطاقة المتولدة (J)

m : الكتلة الفعلية المتحولة إلى طاقة (kg)

C : سرعة الضوء (3×10^8 m / s)

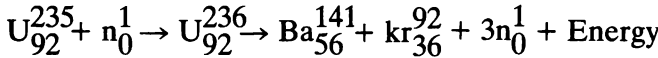
هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية المعروفة وهي :

١ - التحلل الإشعاعي (الإضمحلال) :

هنا يتحول النظير المشع عبر فترة زمنية طويلة إلى عناصر أخرى أكثر ثباتاً وتنتقل خلال هذه العملية جسيمات α (ألفا) و β (بيتا) وأشعة γ (جاما) .

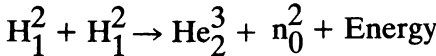
٢ - الانشطار النووي :

وفيه يتم انشطار نواة الذرة إلى نواتين أو أكثر أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة حسب معادلة اينشتاين كما هو الحال في القنبلة الذرية. ومن الأمثلة على هذا النوع من التفاعل هو انشطار نظير اليورانيوم ٢٣٥ عند قذفه بنيوترون إلى نواتين لعنصرين جديدين هما الباريوم (Ba) والكربتون (Kr) ويكون مجموع الكتلتين الجديديتين أقل من الكتلة الأصلية .



٣ - الاندماج النووي :

في هذا التفاعل تندمج عدة أنوية خفيفة لتشكل نواة واحدة أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة. ومن الأمثلة على هذا التفاعل هو اندماج نواتين من الديتيريوم (Deuterium) (هيدروجين - 2) أو الهيدروجين الثقيل H_1^2 لتكوين ذرة هيليوم He ونيوترون n . ويحتاج هذا التفاعل (الاندماج) - لكي يتم - درجة حرارة مقدارها $5,8 \times 10^8$ كلفن .



وتعد القنبلة الهيدروجينية تطبيقاً لهذا النوع من التفاعلات الاندماجية .

هناك عدة ميزات للاندماج النووي مقارنة بالانشطار النووي :

(١) هناك احتياطات أكبر في العالم من النظائر القابلة للاندماج (وقود الاندماج النووي) من احتياطات وقود الانشطار النووي .

فالهيدروجين الثقيل (2 - Hydrogen) أو الديتيريوم يوجد في الطبيعة بنسبة ١ / ٦٧٠٠ من الهيدروجين العادي .

(ب) ان نواتج الاندماج النووي ليست ذات مستويات إشعاعية كنواتج الانشطار النووي فهي ذات إشعاعية أقل ولذلك فإنها أقل خطراً على البيئة والناس .

(ج) إن الاندماج النووي هو تفاعل يحتاج إلى عملية بدء غاية في الصعوبة وكذلك فإنه من الصعب أيضاً إبقائه مستمراً ولهذا فإن أي تغيير بسيط في ظروف التفاعل يوقفه رأساً مما يعمل على منع حدوث خطر في حالة حدوث خلل فني في المفاعل النووي .

(د) إن الطاقة المتولدة من الاندماج النووي أكبر منها بكثير في حالة الانشطار النووي .

وبشكل عام فإن هناك عدة مشاكل تعترض استخدام الطاقة النووية بشكل واسع منها :

(أ) التكاليف الباهظة لإنشاء المحطات والمفاعلات النووية .

(ب) الحاجة إلى توافر الخبرة الفنية العالية والمدربة .

(ج) مخاطر الحوادث وتلوث البيئة ومشكلة التخلص من النفايات النووية .

(د) صعوبة الحصول على الوقود الذري (في حالة الانشطار النووي فإن الوقود هو اليورانيوم المشع) .

يقدر احتياطي العالم من نظير اليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ بحوالي $١٣,٧ \times ٢١١٠$ جول ومن نظير اليورانيوم $^{238}_{92}\text{U}$ بحوالي ١٨٠٠×٢١١٠ جول ومن الديتيريوم (H_2^2) أو الهيدروجين الثقيل بحوالي ٦٠٠٦١×٢٣١٠ جول وهناك احتياطات أخرى هائلة من عناصر مشعة أخرى .

١ - ٦ - ٦ طاقة المد والجزر : (Tidal energy)

تُعطي حركة المد والجزر في المحيطات كمية كبيرة جداً من طاقة الحركة التي يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية بواسطة توربينات مائية . وتعد طاقة المد والجزر إحدى مصادر الطاقة القادمة من خارج نطاق الكرة الأرضية إذ انها تعود بشكل أساسي إلى قوة جذب القمر للأرض، حيث تؤثر هذه القوة القمرية على المحيطات وتتسبب في السريانات المدية باتجاه الشواطئ والتي يتراوح ارتفاعها من أجزاء من المتر إلى ثمانية أو تسعة أمتار . إن استغلال هذا المصدر من الطاقة ليس من الأمور السهلة وذلك للأسباب التالية :

١ — يتطلب بناء محطة كهربائية وصول مياه المد إلى ارتفاع عشرة أمتار وهذا لا يتوافر إلا في عدد محدود من خلجان العالم .

٢ — التذبذب الكبير في مستوى مياه المد العالي .

٣ — اتجاه حركتي المد والجزر المتعاكستين مما يؤدي إلى صعوبة في تصميم التوربينات .

٤ — صعوبة بناء المحطات المدية بسبب الصعوبات الجغرافية والطبيعية .

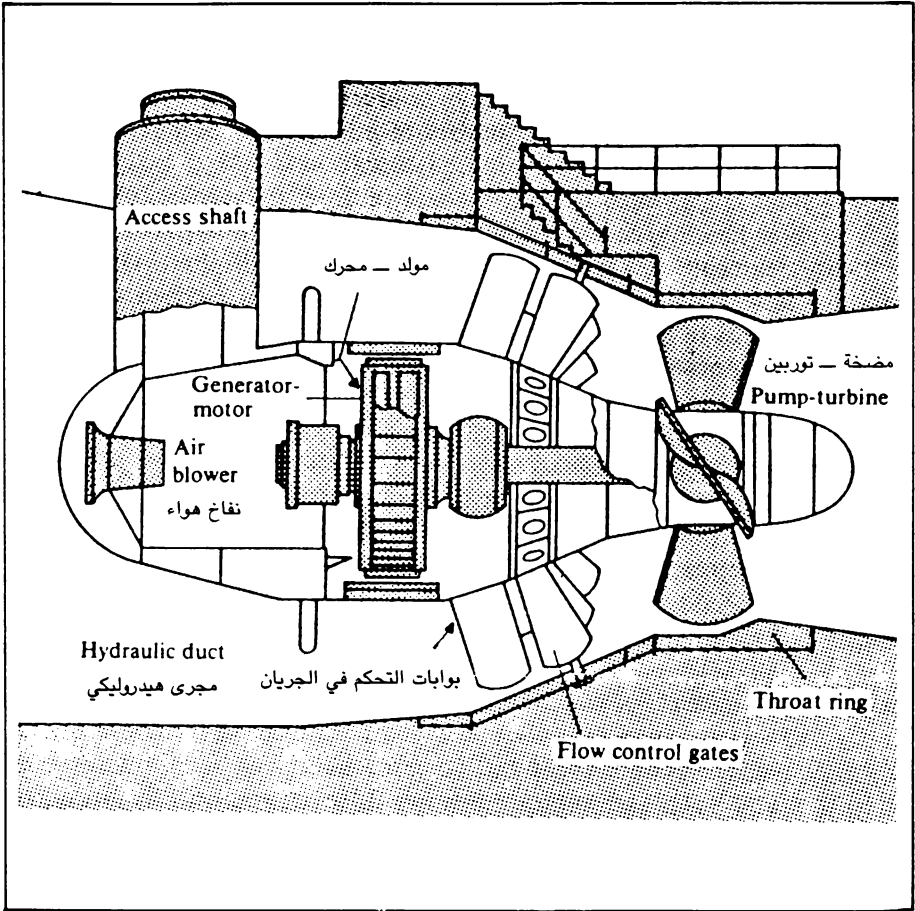
٥ — انخفاض معدل التشغيل السنوي لهذه المحطات .

على الرغم من أن استغلال طاقة المد والجزر على نطاق واسع لا يقدم حلاً لمشكلة احتياجات العالم من الطاقة فإن هذا المصدر يعد من المصادر الهامة والمرغوبة لكون طاقة المد والجزر طاقة متجددة (غير قابلة للفناء) وغير ملوثة للبيئة .

ومن أهم المحطات المدية في العالم تلك التي بناها الفرنسيون عند مصب نهر رانس، وتعمل هذه المحطة أربعاً وعشرين ساعة في اليوم وتولد ما مقداره ٢٤٠ ميغاواط من الكهرباء ، أي ما يعادل حوالى ٤ ٪ من الطاقة الكهربائية في فرنسا .

وتقدر القدرة الموجودة في حركة المد والجزر في العالم بحوالى 8×10^{12} كيلواط .

يبين الشكل (١ - ٩) إحدى الوحدات الانعكاسية (تعمل كتوربين أو مضخة) المستخدمة في المحطة المدية على نهر رانس بفرنسا .



الشكل (١ - ٩)

إحدى وحدات (توربين - مضخة) المستخدمة
في محطة رانس المدية لتوليد الطاقة الكهربائية

١ - ٦ - ١ عمل محطات الطاقة المدّية :

(Tidal power plant operation)

في محطة الطاقة المدية يتم تحويل طاقة الوضع للماء إلى طاقة ميكانيكية (تتحول إلى طاقة كهربائية) خلال مرور الماء في توربينات مائية معدّة لهذه المحطات .

ويعتمد عمل المحطة المديّة على بناء حاجز (Barrier) لتخزين مياه المد في حوض (Basin) خلف هذا الحاجز عند حدوث المد وتفرّغه عند حدوث الجزر .

ويتم توليد الطاقة الكهربائية عند مرور الماء عبر توربينات خلال حركتي المد والجزر إلى الحوض ، ويمتلئ الحوض ويفرغ من الماء خلال دورة مدية كاملة يستغرق حدوثها ١٢ ساعة و ٢٥,٥ دقيقة .

حجم الماء الداخل للحوض خلال حركة المد

$$V = A \Delta Z \quad (١٠ - ١)$$

حيث :

A : مساحة الحوض المتوسطة (m^2)

ΔZ : ارتفاع مياه المد (m)

حجم الماء المتدفق عبر التوربين في دورة مدية كاملة (مدّ + جزر)

$$V_{cycle} = 2 A \Delta Z \quad (١١ - ١)$$

معدل تدفق الماء \dot{m} (kg/s)

$$m = \frac{2 \rho A \Delta Z}{T} \quad (١٢ - ١)$$

حيث :

ρ : كثافة الماء (kg/m^3)

T : زمن الدورة المدية الكاملة ($T_{cycle} = 12.425 \text{ hours}$)

ويؤخذ العلو المتوسط العامل على التوربين مساوٍ ($\Delta Z/2$) ، أما القدرة النظرية القصوى المعدّلة (Theoretical maximum average power) المتولدة في المحطة المديّة فتعطى بالمعادلة :

$$P_{max} = \frac{\rho A g (\Delta Z)^2}{T} \quad (١٣ - ١)$$

ولكن القدرة الفعلية المتولدة من المحطات المديّة تكون أقل بكثير من القدرة النظرية القصوى، ويعود ذلك أساساً إلى أن العلو الفعال العامل يكون أقل من العلو المتوسط ($\Delta Z/2$) ولهذا فإن التوربينات المديّة تصمم لكي تكون قادرة على العمل بفعالية تحت قيم منخفضة لعلو الماء .

ويتم عادة حساب القدرة السنوية المعدّلة القصوى (Annual average maximum power) للمحطة المديّة وذلك بالتعويض عن ΔZ في المعادلة (١٣-١) بقيمتها السنوية المتوسطة . أما القدرة الفعلية المعدّلة المتولدة من المحطة المديّة فتكون عبارة عن حاصل ضرب القدرة القصوى المعدلة ومعامل التشغيل السنوي للمحطة والذي تبلغ قيمته حوالى (0.11) للمحطات ذات التأثير المفرد (Single - effect operation) وحوالى (0.13) للمحطات ذات التأثير الثنائي (Double - acting operation) أي المحطات التي تولد القدرة في حركتي المدّ والجزر .

مثال :

تبلغ المساحة المتوسطة لحوض محطة مديّة ٧٠ سم^٢ ومعدل ارتفاع مياه المد السنوي ١٠ م ومعامل التشغيل السنوي للمحطة ٠,١٢ ، احسب معدل إنتاج القدرة السنوي لهذه المحطة .

$$P_{\max} = \frac{\rho A g (\Delta Z)^2}{\tau} \quad P_{\max} \text{ القدرة النظرية القصوى}$$

$$= \frac{1025 (70 \times 10^6) 9.81 \times (10)^2}{12.425}$$

$$= 5.665 \times 10^{12} \text{ J/h (جول / ساعة)}$$

$$= 5.665 \times 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{h}} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \times 10^{-6}$$

$$= 1573.6 \text{ MW (ميغاواط)}$$

القدرة الفعلية المعدلة P_a

$$P_a = f P_{\max}$$

$$= 0.12 \times 1573.6 = 188.8 \text{ MW}$$

• • •

الفصل الثاني

مبادئ تحويل الطاقة

٢ - ١

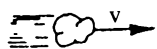
اعتبارات عامة في تحويل الطاقة

واحد من الأمثلة السهلة على الطاقة هو الجهد المطلوب لرفع كتلة من مستوى منخفض إلى مستوى أعلى . ولعمل ذلك ، فإنه من الضروري استخدام قوة أكبر بقليل من القوة المؤثرة إلى أسفل على هذه الكتلة (قوة الجاذبية) ، فالشغل المبذول في رفع هذا الجسم يساوي الكسب أو الزيادة في طاقة الوضع لهذا الجسم في مجال الجاذبية الأرضية . ويمكن استعادة هذا الشغل بترك الجسم يسقط من المستوى العالي إلى المستوى المنخفض . ومن الأمثلة الأخرى لطاقة الوضع، طاقة المرونة المختزنة في زنبرك عند شده أو انضغاطه . ومن الأشكال الأخرى للطاقة الميكانيكية طاقة الحركة .

وتعرف الطاقة بأنها القابلية لعمل أو إنجاز شغل . يبين الشكل (٢ - ١) أشكالاً متعددة للطاقة .

ميكانيكية Mechanical

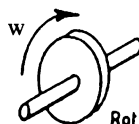
حركة KINETIC



$$\frac{1}{2}mv^2$$

Translation

انتقالية

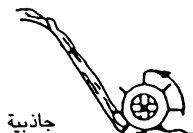


$$\frac{1}{2}Iw^2$$

Rotation

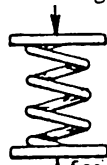
دوران

وضع POTENTIAL



جاذبية

Gravitational



زنبرك

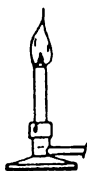
Spring



غاز مضغوط

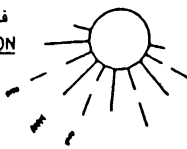
Compressed Gas

حرارية THERMAL



فوتونات

PHOTON



كيميائية

CHEMICAL



فحم

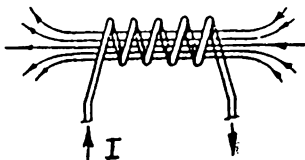
Coal



بنزين

Oil

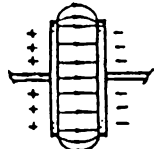
مغناطيسية MAGNETIC



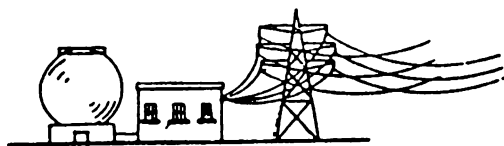
I

كهروساكنة

ELECTROSTATIC



نووية NUCLEAR



Some energy forms

الشكل (٢ - ١)
بعض أشكال الطاقة

٢ - ٢

مبدأ حفظ الطاقة القانون الأول في الثيرموديناميك

ينص مبدأ حفظ الطاقة (القانون الأول في الثيرموديناميك) . على أن مجموع الطاقات من كافة الأشكال في نظام مغلق يبقى ثابتاً .

فإذا حدثت عملية في نظام مغلق أدت إلى زيادة في أحد أشكال الطاقة ، فإن هذا يعني أن أشكالاً أخرى للطاقة في النظام سوف تنقص أو تقل بنفس المقدار .

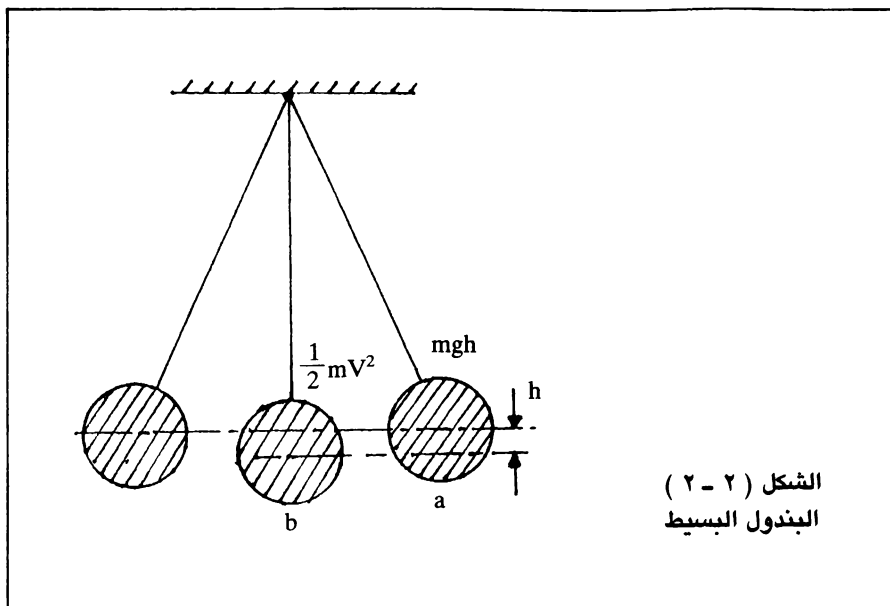
مثال :

في حالة البندول البسيط المبين في الشكل (٢ - ٢) ، فإن طاقة الوضع تكون أكبر ما يمكن في الوضع (a) وتساوي (mgh) ، وتكون طاقة الحركة في هذا الوضع صفراً . وعند تحرك البندول باتجاه الوضع (b) ، تزداد طاقة الحركة تدريجياً على حساب النقصان في طاقة الوضع بحيث يبقى مجموعهما ثابتاً ، وعند الوضع (b) يصل البندول إلى أقصى سرعة له ، وتصبح طاقة حركته ($\frac{1}{2} m V^2$) وطاقة وضعه صفراً . وهكذا يتم تبادل أشكال الطاقة في هذا النظام .

وفي الديناميكا الحرارية (الثيرموديناميك) ، فإن القانون الأول ينص على ما يلي :

عندما يُنفَّذ النظام عملية مغلقة ، فإن الشغل المنجز يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة .

يفسر القانون الأول طبيعة العلاقة بين الحرارة المنتقلة والشغل المنجز في



آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة ، رياضياً ، فإن هذا القانون يُكتب على النحو الآتي :

$$\Delta U = Q - W \quad (٢ - ١)$$

حيث :

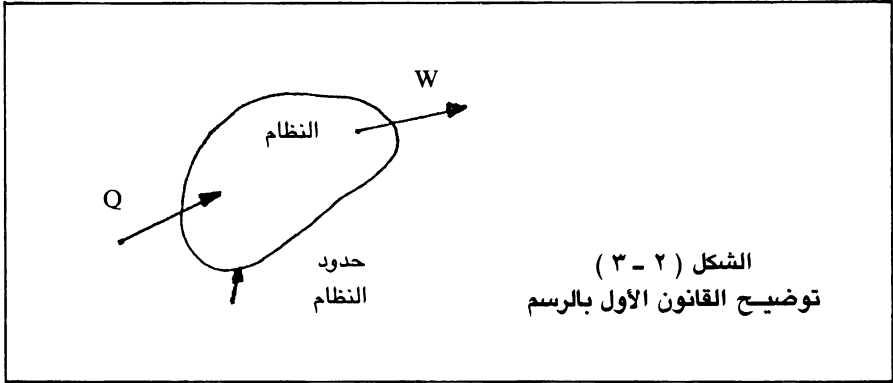
ΔU : التغير في الطاقة الداخلية للنظام (J) .

W : الشغل الذي ينجزه النظام (J) .

Q : الحرارة المنتقلة عبر حدود النظام (J) .

يبين الشكل (٢ - ٣) توضيحاً بالرسم للقانون الأول .

إن القانون الأول يبين لنا بأن الشغل الموجب الذي تنتجه آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية يزداد مع زيادة الحرارة المنتقلة من المحيط الخارجي (حرارة موجبة) ، وتعرّف الكفاءة الحرارية لهذه الآلة بأنها مقدار الشغل الموجب الذي ينجزه النظام مقسوماً على الحرارة المضافة — عبر حدود هذا النظام — من المصدر الخارجي :



$$\eta_{th} = \frac{W_n}{Q_a} \quad (2-2)$$

وهكذا نجد أن القانون الأول يحدد مقدار الشغل (الطاقة المفيدة) الذي يمكن الحصول عليه من مصدر الطاقة الخارجي المتوافر: كطاقة الوقود الكيميائية (فحم ، بترول ...) أو طاقة الماء أو طاقة الرياح .

٢ - ٢ - ١ تطبيقات على القانون الأول :

يبين الشكل (٢ - ٤) نظاماً ثيرموديناميكياً بسيطاً ومعزولاً ($Q = 0$) يتم فيه نقل الطاقة (تحويل الطاقة) بواسطة الشغل ، حيث يتم إنجاز الشغل عند تحرك المكبس مسافة مقدارها (ds) ، ويعطي هذا الشغل بالمعادلة الآتية :

$$dW = p A ds \quad (2-3)$$

حيث :

dW : كمية الشغل التفاضلية المنجزة (J) .

A : مساحة المكبس (m^2) .

ds : المسافة التفاضلية التي يتحركها المكبس (m) .

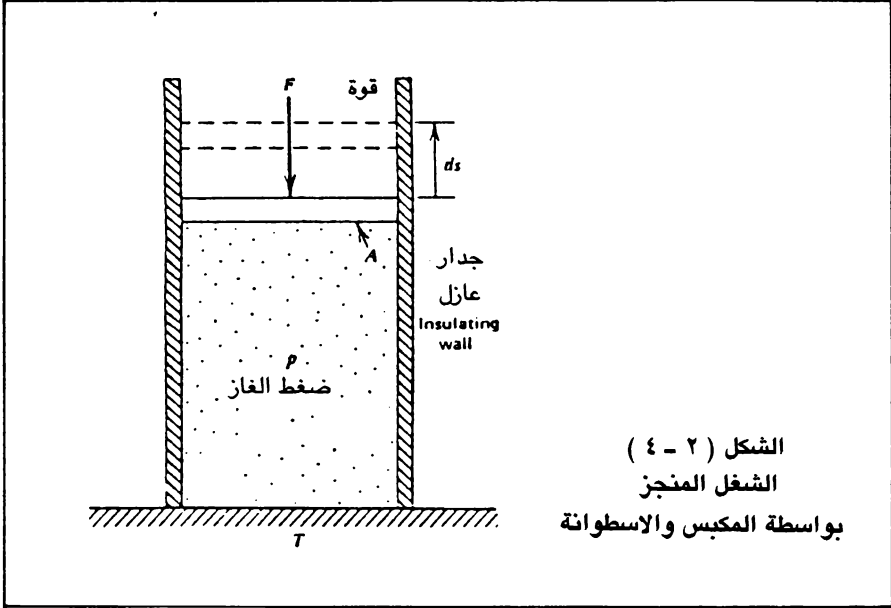
p : ضغط الغاز في الأسطوانة ، $P = F / A$, (N / m^2) .

ويمكن كتابة المعادلة (٢ - ٣) بالطريقة الآتية :

$$dW = p dV \quad (٢ - ٤)$$

حيث :

dV : الحجم المزاح التفاضلي (m^3) .



وفي حالة التغير المحدد من حجم ابتدائي (V_1) إلى حجم نهائي (V_2) ، فإن كمية الشغل المنجز :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV \quad (٢ - ٥)$$

حيث انه بالإمكان إيجاد قيمة (W) من المعادلة (٢ - ٥) إذا تم تحديد العلاقة بين الضغط (P) والحجم (V) . ويكون الشغل المنجز موجباً (الشغل المنجز

بواسطة النظام) إذا كان ($V_2 > V_1$) ويكون الشغل سالباً (الشغل مبذول على النظام) ، إذا كان ($V_1 > V_2$) .

مثال :

افترض أن ($p = K / V$) احسب قيمة (W) من المعادلة ($٢ - ٥$) عند تحرك المكبس من الحجم (V_1) إلى الحجم (V_2) .

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{K}{V} dV$$

$$W = k \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = k \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

لاحظ أن اللوغاريتم الطبيعي (\ln) لعدد أقل من ١ يكون سالباً ، مما يعني أنه في حاله كون ($V_2 < V_1$) ، فإن الشغل المنجز يكون سالباً .

مثال :

في الشكل (٢ - ٤) ، قطر المكبس هو ١٠ سم ، فإذا تحرك هذا المكبس مسافة ٤ سم ، فما هو مقدار التغير في حجم الاسطوانة ؟ إذا كانت الإزاحة الحاصلة تعود لتأثير قوة خارجية مقدارها ١٠٠٠٠ نيوتن ، فما هو مقدار الشغل المنجز ؟ وما هو مقدار الضغط داخل الاسطوانة ؟

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_2 - V_1 = A \Delta s \\ &= \frac{\pi \times 10^2}{4} \text{cm}^2 \times 4 \text{ cm} \\ &= 314.2 \text{ cm}^2 \\ &= 3.142 \times 10^{-4} \text{m}^3 \end{aligned}$$

$$W = F \cdot \Delta s = 10^4 \times 0.04 = 4 \times 10^2 \text{ J}$$

$$W = p \Delta V, P = \frac{W}{\Delta V}$$

$$P = \frac{4 \times 10^2}{3.142 \times 10^{-4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \text{ N/ m}^2$$

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{أيضاً :}$$

$$P = \frac{10^4}{\frac{\pi (0.1)^2}{4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \text{ N/ m}^2$$

مثال :

في نظام ثيرموديناميكي كانت كمية الحرارة المنتقلة من المحيط الخارجي إلى النظام (40 KJ) ، والشغل الذي ينجزه النظام هو (45000 J) . احسب مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام . وفي إجراء آخر بين نفس الحالتين الابتدائية والنهائية للنظام ، أنجز النظام شغلاً يساوي (35000 J) . احسب مقدار واتجاه (إشارة) الحرارة المنتقلة خلال هذا الإجراء الجديد .

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q - W \quad \text{بتطبيق القانون الأول}$$

$$\Delta E = 40000 - 45000 = - 5000 \text{ J} \quad \text{تقل الطاقة الداخلية للنظام بمقدار :}$$

$$\Delta E_{\text{constant}} = - 5000 \text{ J} \quad \text{خلال الإجراء الجديد ،}$$

$$- 5000 - Q = 35000 \quad \text{تنتقل الحرارة باتجاه موجب}$$

$$Q = + 30000 \text{ J} = + 30 \text{ KJ} \quad \text{من المحيط الخارجي إلى النظام .}$$

٢ - ٢ - ٢ الطاقة الداخلية : (Internal energy)

من الممكن بناء نظام ثيرموديناميكي تام العزل ، بحيث يتم الانضغاط من دون حدوث أي تبادل حراري عبر حدود هذا النظام ، والإجراء الذي يتم من دون انتقال للحرارة ($Q = 0$) في مثل هذا النظام يسمى بالإجراء الأديابتيكي . ومن الخصائص الهامة لهذا الإجراء أن الشغل المنجز خلال هذا الإجراء يعتمد فقط على نقاط البداية والنهاية للإجراء، وليس على المسار (path) الذي يتخذه الإجراء.

يمكن كتابة المعادلة (٢ - ١) بصيغتها التفاضلية (Differential form) على النحو :

$$dQ = dU + dW \quad (٢ - ٦)$$

وللإجراء الأديابتيكي ($dQ = 0$) ، فإن هذه المعادلة تصبح :

$$W = - \int_{U_1}^{U_2} dU = U_1 - U_2 \quad (٢ - ٧)$$

وهكذا ، فإن مقدار الشغل المنجز في الإجراء الأديابتيكي يعتمد فقط على قيم الطاقة الداخلية الابتدائية (U_1) والنهاية (U_2) ، وليس هناك ضرورة لمعرفة مسار الإجراء كما هو واضح من المعادلة (٢ - ٧) .

في الإجراء الذي يبقى فيه الحجم ثابتاً (ثبات الحجم) ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = dU \quad (dV = 0) \quad (٢ - ٨)$$

وبقسمة طرفي المعادلة على (dT)

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} \quad (dV = 0) \quad (٢ - ٩)$$

ولكن القيمة (dQ / dT) هي تعريف السعة الحرارية ، وبما أن الحجم يبقى ثابتاً فإن هذه السعة ، هي السعة الحرارية عند ثبات الحجم (C_V) .

$$\frac{dQ}{dT} = C_v \quad (٢ - ١٠)$$

من المعادلتين (٢ - ٩) و (٢ - ١٠)

$$dU = C_v dT \quad (dV = 0) \quad (٢ - ١١)$$

هناك حالات تبقى فيها المعادلة (٢ - ١١) قابلة للتطبيق (صحيحة) ، حتى في حالة تغير الحجم ($dV \neq 0$) . ولهذا ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = C_v dT + p dV \quad (٢ - ١٢)$$

٢ - ٢ - ٣ إجراءات الغاز المثالي :

الغاز المثالي (Ideal gas) هو الغاز الذي يحقق المعادلات الآتية :

$$\left. \begin{array}{l} PV = nRT \\ \text{or} \\ P_v = R T \end{array} \right\} \quad (٢ - ١٣)$$

$$C_p = \text{constant} \quad (٢ - ١٤)$$

حيث :

P : ضغط الغاز المطلق (N / m^2) .

V : حجم الغاز (m^3) .

N : عدد المولات (number of moles) للغاز .

R : ثابت الغاز ($J / mole. K$) .

T : درجة حرارة الغاز المطلق (K) .

v : الحجم النوعي للغاز (m^3 / kg) .

C_p : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط ($J / kg. K$) .

ويطلق على المعادلة (٢ - ١٣) اسم معادلة الحالة للغاز (Equation of State) في أغلب الأحيان .

ترتبط كل من (C_p) و (C_v) بالمعادلة :

$$C_p = C_v + nR \quad (٢ - ١٥)$$

من المعادلتين (٢ - ١٣) و (٢ - ١٥) — وباستخدام الصيغة التفاضلية (dQ / dT) لتعريف الحرارة النوعية — فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = C_p dT - Vdp \quad (٢ - ١٦)$$

١ — الإجراء الأدياباتيكي : (Adiabatic process)

باستخدام المعادلة ($dQ = 0$) للإجراء الأدياباتيكي فإنه بالإمكان حذف (dt) من كلا المعادلتين (٢ - ١٢) و (٢ - ١٦) للوصول إلى المعادلة :

$$p V^\gamma = \text{const.} \quad (٢ - ١٧)$$

حيث :

$$\gamma : \text{الأس الأيسونتروبي للغاز} \left(\gamma = \frac{C_p}{C_v} \right)$$

ويمكن حساب الشغل المنجز في حالة الإجراء الأدياباتيكي من المعادلة (٢ - ١٢) كما يلي :

$$0 = C_v dt + P dV \quad (٢ - ١٨)$$

أو :

$$\Delta W = - C_v \Delta T \quad (٢ - ١٩)$$

مثال :

يدخل البخار لتوربين — ضغط منخفض بدرجة حرارة ٢٦٠ °س ويخرج بدرجة حرارة ٣٥ °س ، بافتراض عدم وجود تبادل حراري مع المحيط الخارجي، ما هو مقدار الشغل الذي ينجزه البخار ؟

إذا كانت الحرارة النوعية للبخار عند ثبات الحجم

$$C_v = 2009.3 \frac{J}{kg \cdot C^\circ}$$

$$\Delta W = - C_v \Delta T$$

$$W = - 2009.3 \frac{J}{kg \cdot C^\circ} (35 - 260) C^\circ$$

$$W = 452093 J / kg$$

يوضح الشكل (٢ - ٥) الإجراء المذكور على مخطط الضغط — الحجم النوعي (P-v) .

٢ — إجراء ثبات الحجم الايسوخوري :

Isovolumnic Process (isochoric)

باستخدام المعادلة ($dV = 0$) لهذا الإجراء فإن الشغل المنجز ($dW = 0$). ومن المعادلة (٢ - ١٢) نجد :

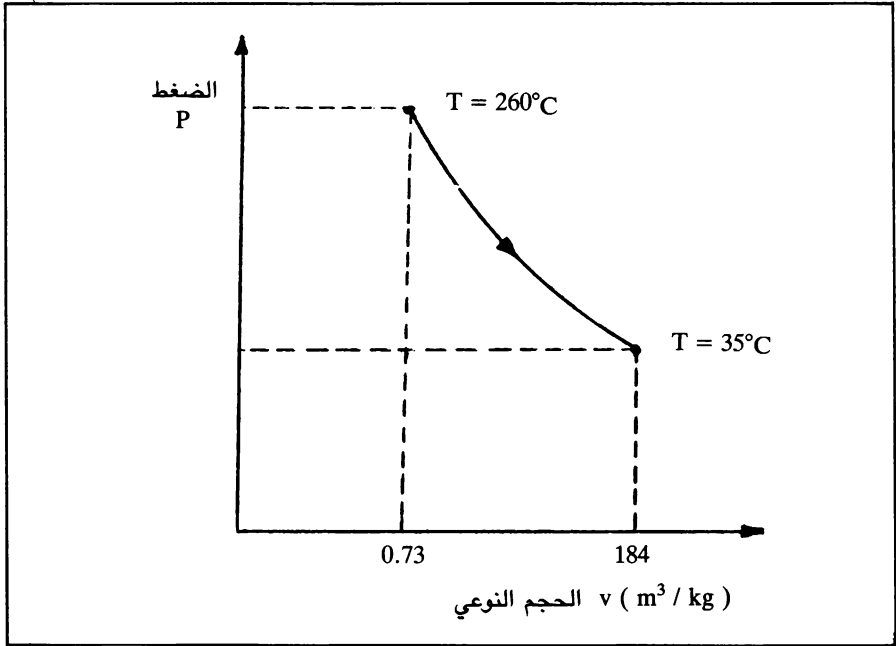
$$dQ = C_v dT \quad (٢ - ٢٠)$$

أو :

$$Q = C_v \Delta T \quad (٢ - ٢١)$$

وبمعرفة الحرارة المكتسبة خلال هذا الإجراء (ثبات الحجم) فإنه يمكن حساب التغير في الضغط بالاستعانة بالمعادلة (٢ - ١٦)

$$C_v dT = C_p dT - V dp \quad (٢ - ٢٢)$$



الشكل (٢ - ٥)
الإجراء الأديابتيكي على مخطط (P-v)

$$dp = \frac{nR}{V} dT \quad (٢٣ - ٢)$$

مثال :

بافتراض أن عملية احتراق شحنة الوقود في أسطوانات السيارة تتم مع ثبات الحجم (تقريباً) ، احسب التغير في الضغط خلال هذا الإجراء إذا علمت أن درجة الحرارة تزداد من ٤٠٠°س إلى ٢١٨٠°س خلال الاحتراق .

بافتراض أن الوسيط العامل هو الهواء فإنه يمكن إيجاد عدد المولات من المعادلة (١٣ - ٢)

$$n = \frac{P_0 V}{RT_0}$$

بالتعويض في المعادلة (٢ - ٢٢)

$$\Delta p = \frac{P_0 V R}{R T_0} \frac{\Delta T}{V} = \frac{P_0 \Delta T}{T_0} = \frac{P_0 (T_1 - T_0)}{T_0}$$

$$T_0 = 400 + 273 = 673 \text{ K}$$

$$T_1 = 2180 + 273 = 2453 \text{ K}$$

$$\Delta P = \frac{1 \text{ atm} \times (2453 - 673)}{673} = 2.64 \text{ atm} \quad (\text{ضغط جوي})$$

٣ - الإجراء الايسوثيرمي - ثبات درجة الحرارة :

(Isothermal Process)

باستخدام المعادلة ($d t = 0$) لهذا الإجراء وبالتعويض في المعادلة (٢ - ١٢) نجد :

$$d Q = p d V \quad (٢ - ٢٤)$$

أو :

$$Q = \int_{V_1}^{V_2} p d V \quad (٢ - ٢٥)$$

وبالتعويض عن (p) من معادلة الحالة للغاز المثالي في المعادلة (٢ - ٢٥) نجد :

$$Q = n R T \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (٢ - ٢٦)$$

مثال :

إحدى وسائل تخزين الطاقة ، تكون بضخ الغاز المضغوط في فجوات ضخمة

تحت الأرض ولعمل ذلك ايسوثيرمياً ، كان الضغط الابتدائي ١ ضغط جوي (1 atm) والضغط النهائي ٢٥ ضغط جوي. فما هو مقدار الحرارة المنتقلة لكل مول في هذا الإجراء؟

افترض درجة الحرارة $T = 30^\circ\text{C}$ ، وأن ثابت الغاز للهواء

$$R_a = 8.317 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}$$

للإجراء الايسوثيرمي فإن $(P_1 V_1 = P_2 V_2)$ ولهذا يمكن كتابة المعادلة (٢ - ٢٦) على النحو :

$$Q = n R_a T \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$Q = 8.317 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} 303 \text{ K} \ln \left(\frac{1}{25} \right)$$

$$Q = -8111.7 \text{ J / mole}$$

حيث ان الإشارة السالبة تعني أن الحرارة تُفقد من النظام (الهواء المضغوط) .

٤ - الإجراء الإيسوباري - ثابت الضغط : (Isobaric Process)

هناك إجراءات حقيقية كثيرة تتم عند ثبات الضغط (مثل معظم التفاعلات الكيميائية) ولهذا الإجراء $(dp = 0)$ ، وبلاستعانة بالمعادلة (٢ - ١٦) نجد :

$$dQ = C_p dT \quad (٢ - ٢٧)$$

أو:

$$Q = C_p \Delta T \quad (٢ - ٢٨)$$

وباستخدام هذه النتيجة فإنه يمكن حساب الشغل من المعادلة (٢ - ١٢)

$$C_p \Delta T = C_v \Delta T + p \Delta V \quad (٢ - ٢٩)$$

٢ - ٣

القانون الثاني في الترموديناميك

بينما يحدد القانون الأول العلاقة بين الشغل والحرارة في الدورة الترموديناميكية فإنه لا يضع حداً لمقدار هذا التحول من شغل إلى حرارة ، فحدود أو مقدار هذا التحول في الدورة المغلقة يحكمه القانون الثاني الذي ينص على ما يلي :

من المستحيل بناء آلة تعمل على دورة ترموديناميكية مغلقة تتحول الحرارة فيها إلى شغل فقط ، بمعنى آخر فإنه من المستحيل الحصول على آلة حرارية كفاءتها ١٠٠ ٪ .

في أي دورة ترموديناميكية حقيقية فإنه يجب أن تكون هناك حرارة مطرودة أو مفقودة — حسب القانون الثاني — ولهذا فإن الشغل الصافي الناتج عن الدورة يكون هو الفرق بين الحرارة المكتسبة أو المضافة للدورة والحرارة المفقودة أو المطرودة من الدورة .

$$W_n = Q_a - Q_r \quad (٢ - ٣٠)$$

وتكون الكفاءة الحرارية للدورة :

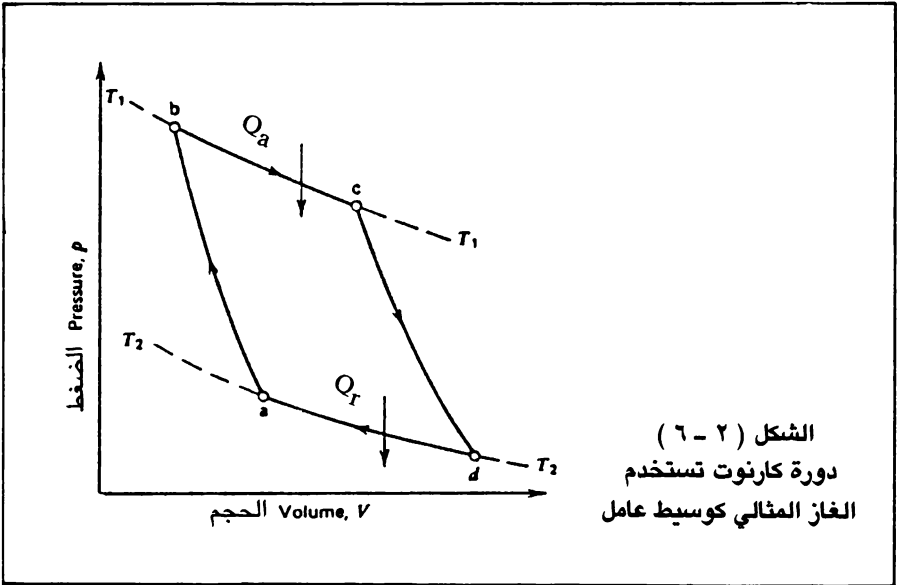
$$\eta_{th} = \frac{Q_a - Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{Q_r}{Q_a} \quad (٢ - ٣١)$$

وكما نرى فإن هذه الكفاءة تكون أكبر ما يمكن (١٠٠ ٪) عندما تكون قيمة الحرارة المطرودة صفراً ($Q_r = 0$) ، ولكن كما سبق وذكرنا فإن ذلك يكون مستحيلاً حسب القانون الثاني

ويبقى السؤال قائماً ، ولكن ما هو مقدار أكبر كفاءة يمكن الحصول عليها من دورة كهذه؟ للإجابة عن هذا السؤال لا بد لنا من دراسة دورة كارنوت (Carnot Cycle) الترموديناميكية .

٢ - ٣ - ١ دورة كارنوت : (Carnot Cycle)

درست هذه الدورة لأول مرة من قبل المهندس الفرنسي (سادي كارنوت) وتتكون من الإجراءات الترموديناميكية الآتية : (شكل ٢ - ٦)



١ - الإجراء (a → b) إجراء انعكاسي أديابتيكي (ايزونتروبي) ترتفع خلاله درجة حرارة الوسيط العامل (غاز) من درجة حرارة المصدر البارد (T₂) إلى درجة حرارة المصدر الساخن (T₁) .

٢ - الإجراء (b → c) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً (ثبوت درجة الحرارة) على درجة حرارة المصدر الساخن (T₁) .

٣ - الإجراء (c → d) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وأديابتيكياً (ايزوثيرمياً) حتى تعود درجة حرارته مرة أخرى إلى (T₂) .

٤ - الإجراء (d → a) يتم خلاله انضغاط الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً على درجة الحرارة (T₂) ، حتى يعود إلى وضعه الأصلي ، وبإتمام هذا الإجراء تكتمل الدورة .

تسمى كل آلة تعمل باستخدام هذه الدورة بآلة كارنوت ، وفي الواقع العملي فإنه لا يوجد مثل هذه الآلة ولكن مفهومها مفيد جداً في الترموديناميكا حيث انه يمكننا من حساب كفاءة هذه الآلة ومقارنة كفاءات الآلات الأخرى بها، لأن كفاءة آلة كارنوت هي أعلى كفاءة يمكن الوصول إليها ولا يمكن لأي آلة حرارية أن تحقق كفاءة أعلى منها. وتعطى كفاءة آلة كارنوت بالمعادلة الآتية

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (٢ - ٢٢)$$

حيث ان :

T₂ : درجة حرارة المصدر البارد المطلقة (K)

T₁ : درجة حرارة المصدر الساخن المطلقة (K)

إن أي آلة حقيقية تعمل بين درجتَي الحرارة (T₁) و (T₂) ، لها كفاءة أقل من كفاءة كارنوت .

مثال :

سيارة كفاءتها الحرارية الفعلية (η_{th} = 30 %) . قارن بين هذه الكفاءة وبين أقصى كفاءة ممكنة للسيارة إذا علمت أن درجة حرارة المصدر الساخن (درجة حرارة الاحتراق داخل اسطوانات السيارة) هي (1500°C) .

نفترض أن درجة حرارة المصدر البارد (الجو) هي (20°C) .

فالسيارة عبارة عن آلة تعمل بين درجتَي حرارة المصدر الساخن (الاحتراق داخل الاسطوانات) والبارد (الجو الخارجي) .

$$T_2 = T_L = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad \text{درجة مطلقة}$$

$$T_1 = T_H = 1500 + 273 = 1773 \text{ K} \quad \text{درجة مطلقة}$$

$$\eta_c = 1 - 293 / 1773 = 0.835$$

فهذه الكفاءة (كفاءة كارنوت) أكبر من الكفاءة الفعلية بمقدار :

$$0.835 / 0.3 = 2.78$$

٢ - ٣ - ٢ المحرك الحراري :

يُعرف المحرك الحراري بأنه محرك (يعمل باستمرار) على نظام ثيرموديناميكي على حدوده تبادل بين الحرارة والشغل .

فهو عبارة عن محول للطاقة يعمل بشكل دوري (يمر الوسيط العامل بإجراءات دورية) ، فيكتسب الحرارة من مصدر ذي درجة حرارة مرتفعة (T_1) ويحول جزءاً من هذه الطاقة إلى شغل مفيد (W_n) ويفقد الجزء المتبقي إلى المصدر ذي درجة الحرارة المنخفضة (T_2) كما هو مبين في الشكل (٢ - ١٧)

يبين الشكل (٢ - ١٧) توربين غازي يعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة ويمثل الخط المنقط حدود هذا النظام حيث يتم اكتساب الحرارة (q_1) وفقد الحرارة (q_2) عبر حدود النظام ويتولد الشغل (W_n) ويقطع حدود النظام. وبما أن الوسيط العامل (الغازات) يمر بعمليات دورية فإن تعريف المحرك الحراري ينطبق على هذا التوربين، فهو محرك حراري.

كفاءة المحرك الحراري :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} \quad (٢ - ٢٣)$$

وبتطبيق القانون الأول في الثيرموديناميك نجد :

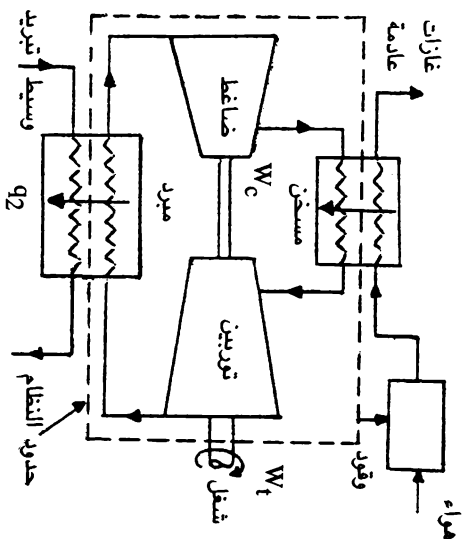
$$W_n = q_1 - q_2 \quad (٢ - ٢٤)$$

إذاً :

$$\eta_{th} = \frac{q_1 - q_2}{q_2} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (٢ - ٢٥)$$

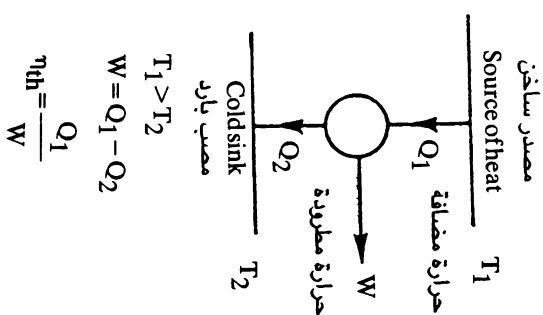
وكما مر سابقاً فإن أكبر كفاءة يمكن الحصول عليها هي كفاءة كارنوت

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (٢ - ٢٦)$$



(ب)

الشكل (٢-٧)
المحرك الحراري



(١)

مثال :

في توربين غازي يعمل على دوره مغلقة كانت الحرارة المكتسبة من مصدر الحرارة الساخن (الوقود) هي (5 KJ) لكل (kg) من الوسيط العامل وكانت الحرارة المفقودة إلى المصبِّ البارد (المكثف) هي (3.5 KJ / kg) . احسب الشغل المنجز وكفاءة الدورة الحرارية .

$$W_n = q_1 - q_2 = 5 - 3.5 = 1.5 \text{ KJ / kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} = \frac{1.5}{5} = 30 \%$$

إذا علمت أن درجة حرارة المصدر الساخن ($T_1 = 1000^\circ \text{C}$) ودرجة حرارة المصبِّ البارد ($T_2 = 25^\circ \text{C}$) فما هي أقصى كفاءة ممكنة لهذه الدورة ؟
أقصى كفاءة ممكنة هي كفاءة كارنوت :

$$\eta_c = 1 - \frac{(25 + 273)}{(1000 + 273)} = 0.776 = 77.6 \%$$

٢ - ٣ - ٣ مخططات الانتروبيا : (Entropy diagrams)

في إجراء ما ، كإجراء انضغاط أو تمدد لغاز من دون حدوث انتقال حرارة من الغاز إلى المحيط الخارجي أو العكس فإن هذا الإجراء يسمى إجراء أديابتيكياً .
فالإجراء الأديابتيكي هو الإجراء الذي تكون فيه ($Q = 0$) وإذا تم هذا الإجراء من دون حدوث فواقد داخلية — كالفواقد الناتجة عن الاضطرابات بين جزيئات الغاز — فإن هذا الإجراء يسمى إجراء انعكاسياً أو ارجاعياً أي انه بالإمكان إعادة هذا الإجراء بشكل عكسي ليعود الغاز إلى حالته الأولى .

والإجراء الذي يحقق هذين الشرطين معاً (الأديابتيكية + الانعكاسية) يسمى بالإجراء الأيزونتروبي (Isentropic) . الانتروبيا التي يرمز لها في الترموديناميكا بالرمز (S) هي مفهوم ترموديناميكي هام . فالإجراء الأيزونتروبي هو ذلك الإجراء الذي لا تتغير فيه قيمة الانتروبيا، أي أن ($\Delta S = 0$) لهذا الإجراء .

إذا تم اكتساب الحرارة (Q) على درجة حرارة مطلقة ثابتة مقدارها (T) فإن الانتروبيا (S) تزداد بمقدار

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (15)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن وحدات الانتروبيا (S) هي (J / kg)

وتبرز أهمية الانتروبيا في الترموديناميكا الحرارية بشكل خاص ، حيث انها تُسهّل رسم الدورات الترموديناميكية وتحليلاتها الرياضية ، ففي دورة كارنوت — الموضحة سابقاً — وجدنا أن هناك إجراءات تبقى فيها الانتروبيا ثابتة (إجراءات ايزونتروبية) ولهذا فإنه من الطبيعي أن نفكر في إعادة رسم هذه الدورة باستعمال مخطط تكون الانتروبيا إحدى إحداثياته ، وفي الترموديناميكا فإنه من المألوف استخدام مخطط درجة الحرارة — الانتروبيا (T - S) لرسم الدورات المختلفة

يبين الشكل (٢ - ٨) دورة كارنوت — تستخدم الغاز كوسيط عامل — على مخطط (T - S) ومن هذا الشكل نجد أن الإجرائين (d → a) و (b → c) هما إجراءان ايزوثيرميان (ثبات درجة الحرارة) ، فالحرارة المكتسبة في الدورة (Q₁) هي المساحة تحت الإجراء (b → c) .

$$Q_1 = T_1 (S_c - S_b) \quad (٢ - ٣٧)$$

والحرارة المفقودة من الدورة (Q₂) هي المساحة تحت الإجراء (d → a)

$$Q_2 = T_2 (S_d - S_a) \quad (٢ - ٣٨)$$

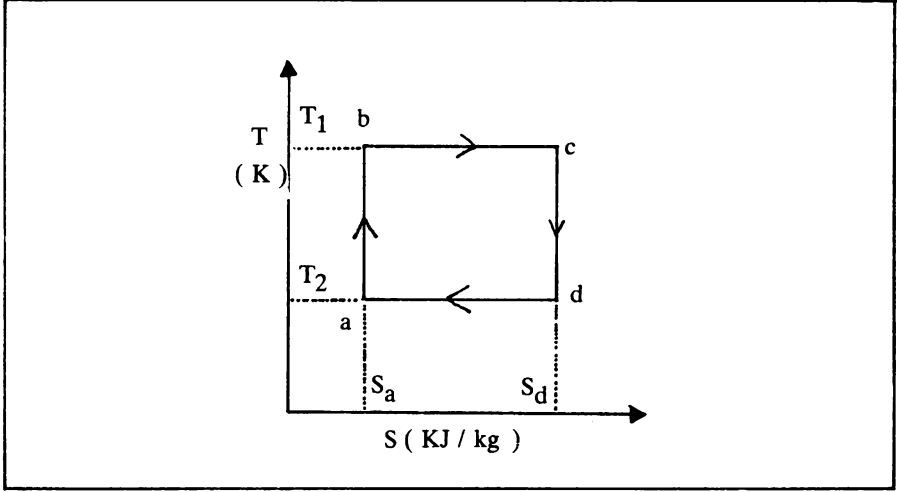
ويعطى الشغل المنجز بالمعادلة :

$$W_n = Q_1 - Q_2 \quad (٢ - ٣٩)$$

ولكن من الشكل نجد أن (S_d - S_a = S_c - S_b) ، إذاً فالمساحة داخل الدورة (a b c d) هي الشغل المبذول :

$$W_n = (T_1 - T_2) (S_d - S_a) \quad (٢ - ٤٠)$$

في الواقع العملي ، فإن الإجراءات يصاحبها دائماً زيادة في الانتروبيا. فالإجراء الأيزونتروبي هو إجراء مثالي من الصعب جداً تحقيقه .

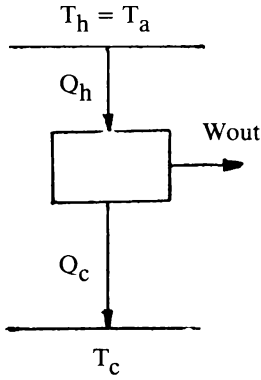


٢ - ٣ - ٤ : الثلاجة (دورة التبريد) والمضخة الحرارية : (Refrigerator and Heat pump)

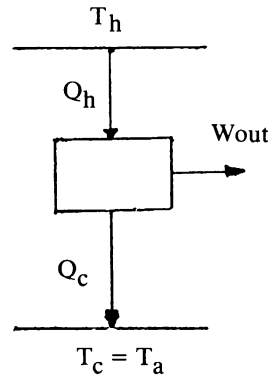
يبين الشكل (٢ - ٩) رسماً توضيحياً للمهمات الأربع التي يقوم بها المحرك الحراري حيث ان الشكل (٢ - ٩) يبين محركاً حرارياً إعتيادياً والشكل (٢ - ٩ ب) يبين محركاً حرارياً يعمل بين درجة حرارة الجو (Ambient temperature T_a) ودرجة حرارة مصدر بارد (T_c) حيث تُمتص الحرارة من المصدر الساخن — نسبياً — (T_a) وتطرد للمصدر البارد (T_c).

مثل هذا المحرك نادر الاستعمال في الواقع العملي لأنه من الصعب توافر مصدر درجة حرارته أقل من درجة حرارة الجو . الشكل (٢ - ٩ ج) يبين محركاً حرارياً معكوساً ، حيث ان الحرارة تُمتص من المصدر البارد (T_c) وتطرد للمصدر الساخن (درجة حرارة الجو T_a) ، وذلك بإضافة شغل مقداره (W_{in}) للنظام ، أي أن هذا المحرك يعمل كثلاجة . يعطى معامل الأداء للثلاجة بالمعادلة :

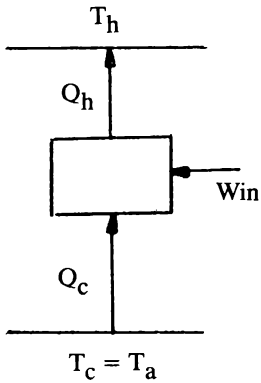
$$(COP)_R = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad (٢ - ٤١)$$



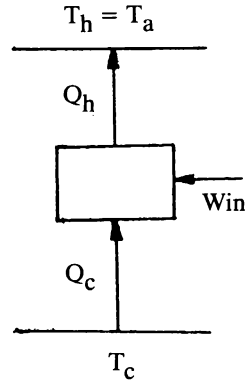
(ب) محرك حراري (بارد)



(أ) محرك حراري اعتيادي



(د) مضخة حرارية



(جـ) ثلاجة

الشكل (٢ - ٩)
المهمات الأربع للآلة الحرارية

حيث :

Q_c : الحرارة الممتصة من المصدر البارد (يطلق عليه اسم المبخر

في الثلاجة) .

W_{in} : الشغل الخارجي المضاف للنظام .

وإذا كان الغرض من المحرك الحراري المعكوس هو امتصاص الحرارة من الجو (T_a) وطرد هذه الحرارة إلى مصدر ذي درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الجو (T_h) ، كما هو مبين في الشكل (٢ - ٩ د) ، فإن هذا المحرك يسمى بالمضخة الحرارية (Heat pump) . ويعطى معامل الأداء للمضخة الحرارية بالمعادلة :

$$(COP)_p = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad (٢ - ٤٢)$$

حيث :

Q_h : الحرارة المطرودة للمصدر الساخن (بدرجة حرارة T_h)

وكما نلاحظ فإن الفرق بين الثلاجة والمضخة الحرارية هو أن الاهتمام في حالة الثلاجة يكون بمقدار الحرارة الممتصة من المصدر البارد (Q_c) في حين أنه في حالة المضخة الحرارية فإن ما يعنينا هو الحرارة المطرودة للمصدر الساخن (Q_h) . باستخدام القانون الأول يمكن إيجاد أقصى معامل أداء ممكن لكل من المضخة والثلاجة كالآتي :

للثلاجة :

$$(COP)_R = \frac{Q_c}{W_{in}} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

$$(COP)_R = \frac{T_h}{T_h - T_c} - 1 = \frac{1}{\eta_c} - 1 \quad (٢ - ٤٣)$$

للمضخة الحرارية :

$$(\text{COP})_p = \frac{Q_h}{W_{in}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

$$(\text{COP})_p = \frac{1}{\eta_c} \quad (٢ - ٤٤)$$

حيث :

η_c : كفاءة دورة كارنوت .

وتكون العلاقة بين معاملي الأداء لكل من الثلاجة والمضخة الحرارية :

$$(\text{COP})_R = (\text{COR})_p - 1 \quad (٢ - ٤٥)$$

٢ - ٤

العوائق العملية في تحويل الطاقة

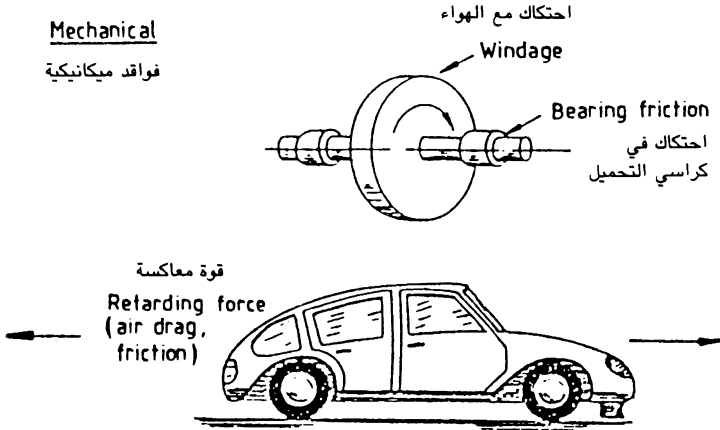
في الواقع العملي فإن جميع الآليات مهما كان نوعها تعاني من بعض فواقد الاحتكاك بدرجة معينة. فالبندول المشروح سابقاً (انظر الشكل (٢ - ٢)) يعاني من فواقد احتكاك لا إرجاعية أو لا إنعكاسية مع الهواء وعند نقطة التعليق. ومع مرور الوقت فإن حركة البندول تتباطأ تدريجياً حتى يتوقف البندول في النهاية عن الحركة. وفي جميع الأجهزة والآلات هناك دائماً ضياعات أو فواقد لا يمكن تجنبها وتسمى هذه الضياعات بالضياعات اللاإرجاعية .

وفي حالة الطاقة الحرارية فإنه لنقل هذه الطاقة يلزم فرق في درجة الحرارة بين نقطتين حتى تنتقل الحرارة بينهما عبر موصلات حرارية لها موصولية «معينة»، وهذا يعني حدوث انخفاض تدريجي في درجة الحرارة باتجاه انتقالها، مما يجعل هذه العملية (عملية انتقال الحرارة) عملية لا إرجاعية .

يبين الشكل (٢ - ١٠) بعض الضياعات اللاإرجاعية .

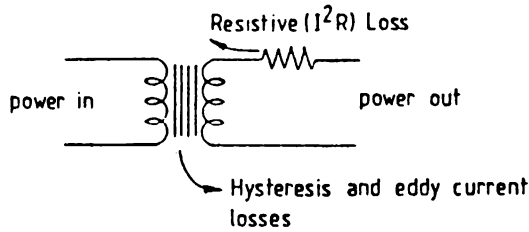
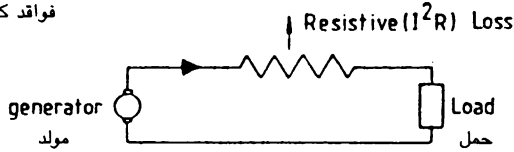
Mechanical

فواقد ميكانيكية



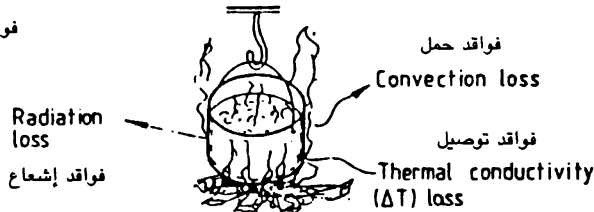
Electrical

فواقد كهربائية



Thermal

فواقد حرارية



الشكل (٢ - ١٠)
بعض الضياعات (الفواقد) اللإرجاعية

اعتبارات عملية في اختيار محولات الطاقة

من خلال دراستنا للقانونين الأول والثاني تبين لنا بأن عملية التحويل الكامل للطاقة من شكل لآخر لا تتم سوى في ظروف مثالية استثنائية . ففي عملية تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية فإن كفاءة التحويل تكون محدودة بدرجتي حرارة كل من المصدر الساخن (Th) ودرجة حرارة المصب البارد (Tc) وأقصى كفاءة يمكن الحصول عليها من عملية التحويل هذه هي كفاءة كارنوت .

فعمليات تحويل الطاقة في الظروف الاعتيادية (غير المثالية) يرافقها دائماً فواقد لا إرجاعية تقلل من كفاءة التحويل .

عند اختيار محول للطاقة في تطبيق عملي معين فإن كفاءة التحويل تلعب دوراً هاماً في عملية الاختيار هذه، إذ أن الخسائر الناتجة عن تدني كفاءة التحويل في حالة استخدام محول الطاقة أو وقود رخيص الثمن قد تزيد عنها في حالة استخدام نظام بديل ذي كفاءة تحويلية أعلى أو وقود مرتفع الثمن — نسبياً — .

فهناك دائماً متغيرات عديدة يجب أخذها بعين الاعتبار والمقارنة فيما بينها عند اختيار نظام معين لتحويل الطاقة تساعد في تحديد الخيار الأنسب، وبعض هذه الاعتبارات ما يلي :

- ١ — رأس المال : التكلفة المبدئية للجهاز أو النظام المراد تشغيله .
- ٢ — تكاليف التشغيل : مثل تكلفة الوقود مع أخذ كفاءة التحويل بعين الاعتبار وتكاليف الخدمة وقطع الغيار .

٣ — متطلبات الصيانة : مثل الفنيين المدربين والمختصين في محطات التوليد الكبيرة .

٤ — الموثوقية أو المعولية (Relaiability) للجهاز أو النظام واستمراره في الأداء . فمثلاً في حالة استخدام مضخة لرفع المياه في عملية الري فإن المطلوب هو جهاز تحويل (محرك) لتشغيل المضخة بشكل مرضٍ فترة طويلة من دون مشاكل فنية ...

٥ — الأمان (Safty) : وهذا اعتبار هام جداً في بعض التطبيقات العملية مثل استعمال اسطوانات الغاز المضغوط في المنازل لإنتاج الطاقة الحرارية .

وعلى المستوى الحكومي فإن اختيار جهاز تحويل الطاقة المناسب يخضع لاعتبارات أخرى أوسع وأشمل من الاعتبارات المذكورة أعلاه مثل : الأمان في التزويد وسياسات التسعير وسياسة الطاقة طويلة الأمد والاستخدام (العمالة) ومشاكل تلوث البيئة والأمان .



الفصل الثالث

إنتاج الطاقة الحرارية

٣ - ١

مقدمة الفصل الثالث

الطاقة الحرارية هي شكل أساسي من أشكال الطاقة حيث ان جميع الأشكال الأخرى من الطاقة يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية .

فالطاقة الميكانيكية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتكاك .

والطاقة الكهربائية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية في عملية تسخين جول، فالحرارة المتولدة نتيجة مرور تيار مقداره (I) أمبير في مقاومة مقدارها (R) أوم هي القدرة الكهربائية ($p_e = I^2 R$) واط .

وتتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية في عملية تسمى بعملية الامتصاص مثل تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية .

والطاقة النووية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة التفاعلات النووية المختلفة كالانشطار والاندماج النوويين .

٣ - ٢

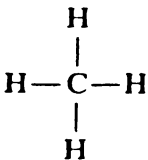
الاحتراق (Combustion)

٣ - ٢ - ١ وقود الاحتراق — المواد الهيدروكربونية التركيبية :

على الرغم من أن المركبات الهيدروكربونية تتكون جميعها من كربون (C) وهيدروجين (H) إلا أن إمكانية ترتيب ذرات الكربون والهيدروجين بعدة طرق تجعل من الممكن الحصول على مركبات هيدروكربونية متعددة وذات خصائص مختلفة تماماً بعضها عن بعض . فالهيدروجين (H) يمكن أن يشارك برابطة تساهمية واحدة بينما يمكن أن يشارك الكربون بأربعة روابط . هناك ثلاث مجموعات رئيسية للمركبات الهيدروكربونية هي :

١ — الهيدروكربونات الأليفاتيكية : (Aliphatic hydrocarbons)

وهي مركبات ذات سلسلة مستقيمة ومفتوحة وتسمى بالمركبات الهيدروكربونية الأليفاتيكية وهذه المركبات لها الصيغة العامة ($C_n H_{2n+2}$) وأبسط هذه المركبات هو الميثان (CH_4) الشكل (٣ - ١) .



الشكل (٣ - ١)
الميثان CH_4

ومعظم وقود المستحاثات تقع ضمن هذه العائلة أو المجموعة. ومن الأمثلة الأخرى على هذه المجموعة البنتان (C_5H_{12} Pentane) .

وتقسم هذه المجموعة إلى ثلاث مجموعات فرعية ، هي :

(أ) الألكانات (Alkane) .

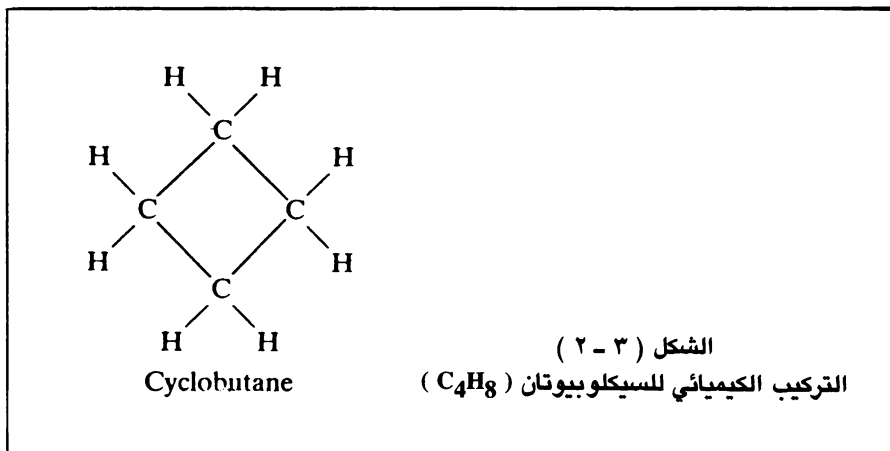
(ب) الألكينات (Alkene) .

(ج) الألكاينات (Alkyne) .

٢ - الهيدروكربونات الأليساكليه - الحلقية :

(Alicyclic hydrocarbons)

وهذه المجموعة هي مجموعة حلقية (Ring) بسبب أن الجزيئات تحتوي على حلقات من ذرات الكربون . والصفة العامة لهذه المجموعة هي $(C_n H_{2n})$ ، ومن الأمثلة على مركبات هذه المجموعة السيكلوبيوتان ، المبين في الشكل (٢ - ٣) .



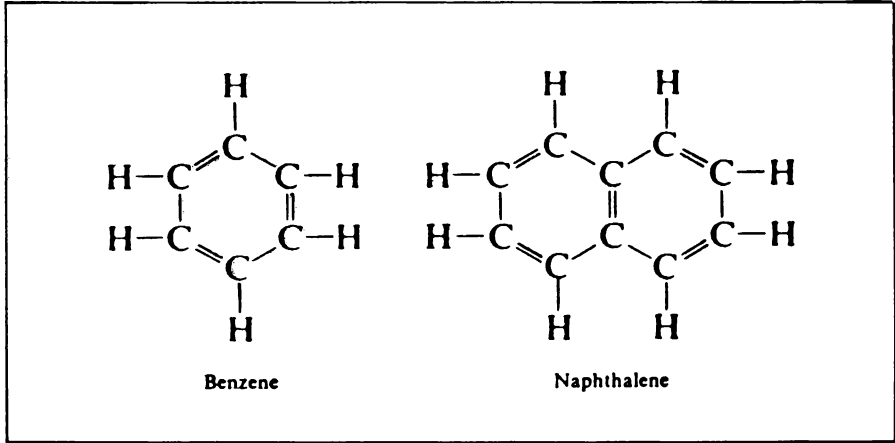
٣ - الهيدروكربونات الأروماتيه أو العطرية : (Aromatic)

وهي أيضاً مركبات حلقية كسابقتها وتكون الحلقة الأساسية هي حلقة بنزين (Benzene ring) أو حلقات بنزين. وهذه الحلقة هي عبارة عن حلقة ذات ست ذرات كربون والصفة العامة لهذه المجموعة ، هي :

للجزيئات ذات الحلقة المفردة ($C_n H_{2n-6}$) .

للجزيئات ذات الحلقة المضاعفة ($C_n H_{2n-12}$) .

ومن الأمثلة على ذلك البنزين ($C_6 H_6$) والنفثالين ($C_{10} H_8$) المبينة في الشكل (٣ - ٣) .



الشكل (٣ - ٣)

التركيب الكيميائي لكل من البنزين والنفثالين

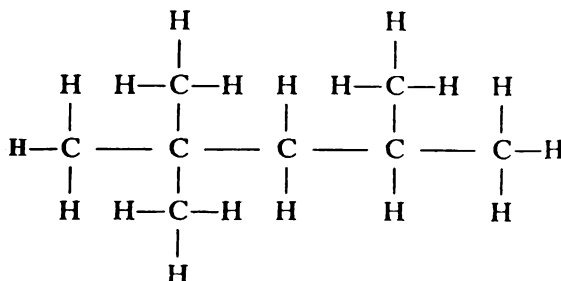
٣ - ٢ - ٢ الوقود المعياري : (Standard Fuels)

هناك مركبات هيدروكربونية أساسية تستعمل كوقود معياري (قياسي) في محرك الاحتراق الداخلي، ففي حالة آلة الاحتراق الداخلي بالإشعال (S I) فإن الوقود لهذه الآلة يُصنف (Rated) حسب رقم الأكتين :

أُعطي الايسوكتين ($C_8 H_{18}$) الرقم الأكتيني (١٠٠) (مئة) الشكل (٣ - ٤) :

وأُعطي n - بنتان ($C_7 H_{16}$) الرقم الأكتيني صفر .

ولمعرفة الرقم الأكتيني لوقود ما يتم إحراقه في آلة فحص خاصة حتى



الشكل (٣ - ٤)
التركيب الكيميائي لمركب الايسوكتين (C_8H_{18})

تحصل ظاهرة الصفع (Detonation) ثم تُخلط نسب حجمية من الايسوكتين و n - بنتان (الوقود المعياري) حتى نصل إلى مزيج له نفس خصائص الوقود المراد فحصه من حيث ظاهرة الصفع فتكون نسبة الايسوكتين في هذا المزيج هي الرقم الأكتيني للوقود تحت الفحص .

ومعظم أنواع البنزين لها أرقام أكتينية تتراوح ما بين (٨٥ - ٩٥) . وهناك أنواع من البنزين لها أرقام أكتينية أعلى من (١٠٠) . ويمكن الحصول على هذا النوع من الوقود بإضافة مواد هيدروكربونية أخف من البنزين أو بإضافة مادة (TEL TetraethylLead) للوقود الأساسي (البنزين) .

بالنسبة لمحرك الاحتراق الداخلي بالانضغاط (C I) فإن وقود هذه المحركات يصنف حسب رقم السيتين (Cetane No.) .

أعطي مركب n - هكسديكين (n-Hexadecane $C_{16}H_{34}$) الرقم السيتيني (١٠٠) مئة .

وأعطي مركب ألفا - ميتانفتالين (alpha-methylnaphthalene $C_{11}H_{10}$) الرقم السيتيني صفر .

ويتم تصنيف وقود محركات الديزل بنفس الطريقة التي يصنف بها وقود

محركات البنزين باستخدام آلة فحص خاصة بمحركات الديزل .
والأرقام السيتينية لمعظم أنواع وقود محركات الديزل تتراوح ما بين
(٣٠ - ٦٠) .

٣ - ٢ - ٣ فيزياء الاحتراق وتفاعلاته :

في الوقت الحاضر فإن المصدر الأساسي للطاقة هو توليد الطاقة الحرارية
من الطاقة الكيميائية وأكثر التفاعلات الطاردة للحرارة أهمية في هذا المجال
هو الاحتراق ، حيث تتأكسد في هذا التفاعل العناصر الثلاثة الرئيسة الموجودة
في وقود المستحاثات ، وهي : الكربون (C) ، والهيدروجين (H) ، والكبريت
(S) ، إلى ثاني أكسيد الكربون (C O₂) ، والماء (H₂ O) ، وثاني أكسيد
الكبريت (S O₂) .

تتم عملية الاحتراق الفعلية لوقود المستحاثات بطريقتين :

١- عند خلط وتسخين الهيدروكربونات في حالتها الغازية — بما في ذلك
السوائل المتبخرة — قبل حدوث الإشعال فإن الأكسجين يتفاعل مع
جزيئات الهيدروكربون في عملية تسمى عملية تكون الهيدروكسيل
(Hydroxlation) والمركبات الناتجة من هذه العملية تسمى
المركبات الهيدروكسيلية والتي تكون غير مستقرة وتتحول بسرعة إلى
الدهايدات (Aldehydes) مثل الفورمالدهايد (Formaldehyde)
(C H₂ O) ومن ثم يحترق الالدهايد إلى ثاني أكسيد الكربون
(C O₂) وماء (H₂ O) واللهب الناتج يكون أزرق اللون وغير
متوهج (non luminous) ، ويستعمل هذا النوع من الاحتراق في
حارق بنسون في المختبر وفي المدافئ وطباخات الغاز في البيوت .

٢- في هذا النوع من الاحتراق يدخل كل من الوقود والهواء إلى الحارقة
من دون عملية خلط مسبقة وهذا يتسبب في حدوث عملية خلط سريعة
جداً وتسخين سريع للوقود والهواء مما يؤدي إلى تحطيم المركبات
الهيدروكربونية إلى مركبات أخف وزناً ومن ثم إلى العناصر الأساسية
من كربون وهيدروجين .

ونتيجة لهذا التحلل الحراري فإن معظم الاحتراق يجري لكل من عناصر الهيدروجين والكربون على حدة ، حيث يحترق الهيدروجين بلهب غير مرئي بينما يحترق الكربون بلهب أصفر ومتوهج. وهذا النوع من التفاعل يَغْلُب على احتراق الوقود الصلب ومعظم المواد الهيدروكربونية السائلة .

واحتراق اللهب الأصفر هو نوع مرغوب من الاحتراق خصوصاً في مراجل المحطات الكبيرة حيث انه يزيد من الطاقة المنتقلة بالإشعاع إلى أنابيب التسخين للمرجل ويخفّض درجة حرارة الاحتراق .

وهناك ثلاث طرق فيزيائية لحرق وقود المستحاثات ، وهي :

١ — طريقة فرش الاحتراق (Burning bed systems) وتستعمل هذه الطريقة لحرق الوقود الصلب كما هو الحال في فرن ستوكر (Stoker furnance) حيث يجري حرق الفحم على قاعدة ثابتة أو فرش ثابت (Stationary bed) وكذلك تستخدم في عملية الاحتراق بواسطة الطبقات المخلطة (Fluidized bed combustion).

٢ — طريقة اللهب المتحرك (Travelling flame) ويستخدم هذا النوع من الاحتراق في حالة استخدام الخط المسبق للمتفاعلات مع الهواء حيث يتحرك اللهب بسرعة عبر الخليط بعد بدء الإشعال كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي بالإشعال .

٣ — المشعل الغازي (Gaseous torch) ويستعمل هذا الاحتراق في محطات الطاقة الكبيرة حيث يجري خلط الوقود والهواء وحرقهما في الحارقة مباشرة. وكذلك ينطبق هذا النوع من التسمية على احتراق الوقود السائل المذّرر (Atomized liquid fuels) والوقود الصلب المسحوق بنعومة فائقة (Finely powdered) كما هو الحال في الفحم الحجري المطحون أو المسحوق (Pulverized coal) وعند حرق الوقود الثقيل بهذه الطريقة يتم تسخينه أولاً ثم تذريره (Atomization) في الحارقة . وهناك طرق أخرى للحرق ، تجمع الثلاثة أنواع — في نفس الوقت — كما هو الحال في الفرن الدوّامي (Cyclone furnace) حيث يحترق الفحم الحجري المهشم في دوّامة مشتعلة .

٣ - ٢ - ٤ تفاعل الاحتراق الكيميائي والقيم الحرارية :

يعتبر الكربون واحداً من أهم العناصر القابلة للاحتراق وجزءاً جوهرياً من أي مركب هيدروكربوني ، وعملية الأكسدة للكربون تعتبر عملية بطيئة وصعبة بالمقارنة مع تأكسد الهيدروجين أو الكبريت على الرغم من أن الكربون له درجة اشتعال أقل منها للهيدروجين وهي 407°C .

في أي عملية احتراق نظرية فإنه من المألوف أن نفترض أن عنصري الهيدروجين والكبريت يحترقان قبل الكربون وكذلك بالإمكان الافتراض أن جميع الكربون يتأكسد إلى أول أكسيد الكربون، (C O) قبل أن يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون (C O₂) والتفاعل الكيميائي للكربون هو :



$$(Q_{\text{C} - \text{CO}} = 110380 \text{ KJ / kg. mol c})$$

حيث ان ($Q_{\text{C} - \text{CO}}$) هي القيمة الحرارية اللازمة لتحويل الكربون إلى أكسيد الكربون (الحرارة المنطلقة أو المحررة نتيجة لهذا التفاعل) وفي هذا التفاعل فإن مولين من الكربون (٢٤,٠٢ كغم) يتفاعلان مع مول واحد من الأكسجين (٣٢ كغم) لإنتاج مولين من أول أكسيد الكربون (٥٦,٠٢ كغم) وإذا توافر الأكسجين بشكل زائد ، فإن أول أكسيد الكربون يتأكسد إلى ثاني أكسيد الكربون حسب التفاعل التالي :



$$(Q_{\text{CO} - \text{CO}_2} = 283180 \frac{\text{KJ}}{\text{kg. mol c}})$$

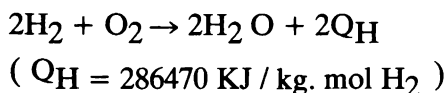
ومن هذا التفاعل نجد أن مولين من أول أكسيد الكربون يتفاعلان مع مول من الأكسجين لإنتاج مولين من ثاني أكسيد الكربون (٨٨,٠٢ كغم) ويلزم كمية من الأكسجين مقدارها (٦٤ / ٢٤,٠٢ = ٢,٦٦ كغم) لحرق (١ كغم) من الكربون بشكل كامل. وهذه النسبة مفيدة في تقدير كمية الأكسجين اللازمة لحرق الهيدروكربونات

$$2.66 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg}^{\circ}\text{C}$$

والقيم الحرارية العليا (H H V) والدنيا (L H V) للكربون متساوية وهي :

$$(H H V = L H V = 32778 \frac{KJ}{kg^{\circ}C})$$

للهيدروجين أعلى درجة حرارة اشتعال (٥٨٢ ° س) من بين العناصر المشتعلة ولكن عملية احتراقه سريعة جداً ويحترق بلهب غير مرئي ، وإذا توافر الأكسجين الكافي فإن الهيدروجين يتحول إلى ماء بسرعة كبيرة جداً — قد تسبق تحول الكربون إلى أول أكسيد الكربون — حسب التفاعل :



وكما نرى فإن مولين من الهيدروجين (٤,٠٣٢ كغم) يتفاعلان مع مول واحد من الأكسجين (٣٢ كغم) لتنتج مولين من الماء (٣٦,٠٣٢ كغم) وهكذا فإن كتلة الأكسجين اللازمة لحرق (١ كغم) من الهيدروجين بشكل كامل هي :

$$32 / 4.032 = 7.94 \text{ kg } O_2 / \text{ kg } H_2$$

والقيمة الحرارية العليا (H H V) للهيدروجين هي :

$$(H H V = 142097 kJ / kg)$$

والقيمة الحرارية الدنيا (L H V) للهيدروجين هي :

$$(L H V = 120067 KJ / kg)$$

أما الكبريت فله درجة حرارة اشتعال مقدارها ٢٤٣ ° س وتنطلق الحرارة من تأكسده إلى ثاني أكسيد الكبريت $S O_2$ — أحد ملوثات الجو الخطرة — بواسطة التفاعل التالي :



حيث إن مولاً واحداً من الكبريت (٣٢,٠٦ كغم) يتفاعل مع مول واحد من الأكسجين (٣٢ كغم) لإنتاج مول واحد من ثاني أكسيد الكبريت (٦٤,٠٦ كغم)

وهكذا يلزم :

$$32 / 32.06 = 0.998 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg S}$$

والقيم الحرارية العليا والدنيا للكبريت متساويتان :

$$(H H V = L H V = 9257 \text{ KJ} / \text{kg S})$$

ولأغراض حسابات الاحتراق فإننا سنفترض أن الهواء الجوي يتكون من ٢١ ٪ أكسجين و ٧٩ ٪ نيتروجين وهذه نسب حجمية وتساوي ٢٢,٢ ٪ أكسجين و ٧٦,٨ ٪ نيتروجين كنسب وزنية (كتلية) .

والوزن الجزيئي للهواء هو :

$$(M W_a = 28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kg. mol}})$$

٣ - ٢ - ٥ القيمة النظرية لنسبة الهواء / الوقود :
(Theortical air-fuel ratio)

إن القيمة النظرية أو الستويكمتريية (Stoichiometric) لنسبة هواء / وقود تُحدّد القيمة الدنيا اللازمة من الهواء ليتم الاحتراق بشكل كامل ، ويمكن التعبير عنها بإحدى النسب الآتية :

١ — كتلة الهواء / كتلة الوقود .

٢ — مولات الهواء / مولات الوقود .

٣ — حجم الهواء / حجم الوقود .

من خلال دراسة تفاعلات الاحتراق ، توصلنا إلى أن نسب الأكسجين اللازمة لحرق كل من الكربون والهيدروجين والكبريت هي :

$$2.66 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg C}$$

$$7.94 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg H}_2$$

$$0.998 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg S}$$

وهكذا فإن نسبة الكتلة (هواء / وقود) النظرية الجافة (dry) :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{\text{كغم } O_2 \text{ اللازمة من الهواء لكل (كغم) من الوقود}}{0.232} \quad (١ - ٣)$$

حيث ان العامل (0.232) في المقام يمثل نسبة الكتلة للأكسجين في الهواء الجوي ، وباستخدام نسب الأكسجين اللازمة لحرق الكربون والهيدروجين والكبريت فإن المعادلة (١ - ٣) يمكن كتابتها على النحو :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{2.66 C + 7.94 H_2 + 0.998 S - O_2}{0.232} \quad (٢ - ٣)$$

حيث ان O_2 : هي النسبة الكتلية للأكسجين الموجود في الوقود .

مثال :

احسب النسبة النظرية هواء / وقود $(A/F)_{th, d}$ لأحد أنواع الفحم الحجري إذا كانت له النسب التالية عند حرقه (As - burned) .

ash (رماد) A % 5 , moisture (رطوبة) M % 4

C % 75.62 , H_2 % 5.01 , O_2 % 6.73 , N_2 % 1.91

S % 1.73 , HHV = 31493 KJ /kg

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{(2.66) (0.7562) + (7.94) (0.0501) + (0.998) (0.0173) - (0.0673)}{0.232}$$

$$= 10.17 \text{ kg (air) / kg (coal)}$$

مثال :

كانت نتائج التحليل النهائي (Ultimate analysis) الوزنية لمكونات أحد أنواع الفحم الحجري كالاتي :

73.99 % C , 5.39 H₂ , 10.02 % O₂

1.38 % N₂ , 1.79 S , ash 7.43 %

إحسب كمية الهواء النظرية اللازمة لحرق هذا الفحم بشكل تام .

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{th,m} = \frac{(2.66) (0.7399) + (7.94) (0.0539) + (0.998) (0.0179) - 0.1002}{0.32}$$

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{th,m} = 9.973 \text{ kg (air) / kg (coal)}$$

في حالة الوقود الغازي ، فإنه من الأسهل التعامل مع نسبة الهواء / الوقود المولية بدلاً من النسبة الوزنية (الكتلية) ، فإذا عرّفنا (Z) بأنها عدد الذرات لعنصر ما ، الموجودة في مول واحد من الوقود فإن هذه القيمة (Z) تكون في الواقع مجموع نواتج ضرب الأجزاء المولية (الكسور المولية) لمركب الوقود وعدد مولات عنصر معين في هذا المركب .

وكمثال لذلك لو أخذنا الايسوكتين :

(C₈ H₁₈ isooctane) — وقود سائل — فإن :

$$Z_C = 8 \text{ للكربون}$$

$$Z_H = 18 \text{ للهيدروجين}$$

وللوقود الغازي المؤلف من :

(50 % CH₄) , (40 % C₂ H₆) , (5 % H₂ S) , (5 % O₂)

فإن :

$$Z_C = (0.5) (1) + (0.4) (2) = 1.3$$

$$Z_H = (0.5)(4) + (0.4)(6) + (0.05)(2) = 4.5$$

$$Z_S = (0.05)(1) = 0.5$$

$$Z_O = (0.05)(2) = 0.1$$

وكما هو الحال بالنسبة لـ (A/F) الكتلية فإن (A/F) المولية تعتمد على نسب الأكسجين المولية اللازمة لحرق مول واحد من كل من الكربون والهيدروجين والكبريت وهي :

$$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } C$$

$$0.25 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } H$$

$$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } S$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, \text{ mol}} = \frac{Z_C + 0.25 Z_H + Z_S - 0.5 Z_O}{0.21} \quad (3 - 3)$$

حيث :

Z_O : عدد مولات الأكسجين في الوقود، والعامل (0.21) في المقام هو نسبة الأكسجين الحجمية في الهواء الجوي .

والعلاقة بين (A/F) الوزنية و (A/F) المولية (الحجمية)

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{28.97}{M W_F} \left(\frac{A}{F}\right)_{th, \text{ mol}} \quad (3 - 4)$$

حيث :

28.97 : الوزن الجزيئي للهواء .

$M W_F$: الوزن الجزيئي للوقود .

مثال :

احسب $(A/F)_{th, mol}$ — المولية — لغاز البترول المسال (L P G)
المكون من $(40 \% C_3 H_8)$ و $(60 \% C_4 H_{10})$

$(A/F)_{th, m}$ — الوزنية — لهذا الوقود .

$$\begin{aligned} Z_C &= 0.4 (3) + 0.6 (4) \\ &= 3.6 \text{ moles of C atoms / mole gas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_H &= 0.4 (8) + 0.6 (10) \\ &= 9.2 \text{ moles of H atoms / mole gas} \end{aligned}$$

النسبة المولية النظرية هواء / وقود

(Theoretical molar air - fuel ratio)

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F} \right)_{th, mol} &= \frac{3.6 + 0.25 (9.2) + 0 - 0}{0.21} \\ &= 28.1 \text{ mole air / mole gas} \end{aligned}$$

نسبة (هواء / وقود) المولية مساوية لنسبة (هواء / وقود) الحجمية

فإن :

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{th, vol} = 28.1 \text{ m}^3 \text{ air / m}^3 \text{ gas}$$

نسبة (هواء / وقود) الوزنية :

$$\left(\frac{A}{F} \right)_{th, mol} = \frac{28.97}{(M W)_{Fuel}} \left(\frac{A}{F} \right)_{th, mol}$$

$$(M W)_{Fuel} = 0.44 (44.094) + 0.6 (58.12) = 52.51 \frac{\text{kg}}{\text{kg.mol}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{28.97 \frac{\text{kg air}}{\text{kg. mol air}} * 28.1 \frac{\text{kg. mol air}}{\text{kg. mol fuel}}}{52.51 \frac{\text{kg fuel}}{\text{kg. mol Fuel}}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = 15.50 \text{ kg air / kg. fuel}$$

٣ - ٢ - ٦ القيمة العملية لنسبة الهواء /

الوقود : (Actual air/Fuel ratio)

إن المتطلبات الخمسة التي تضمن حدوث احتراق جيد (كامل) هي :

- ١ — خلط جيد للمواد المتفاعلة .
- ٢ — هواء كافٍ .
- ٣ — درجة حرارة كافية .
- ٤ — وقت كافٍ .
- ٥ — كثافة كافية للمزيج لضمان انتشار اللهب .

إن الخلط المثالي (الكامل) من الصعب جداً الحصول عليه في عمليات الاحتراق الفعلية ، إلا أنه بالإمكان ضمان حدوث احتراق جيد وذلك بتزويد عملية الاحتراق بالهواء الزائد . وطبيعة نواتج الاحتراق (الغازات العادمة) تعتمد على كمية الهواء الزائد ودرجة الخلط (كفاءة الخلط) للمواد المتفاعلة. وتضم هذه النواتج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وثاني أكسيد الكبريت وبعض المواد التي لم يكتمل احتراقها كجزء من الوقود غير المحترق وأول أكسيد الكربون وهيدروكربونات والدهايدات ونيتروجين ومركبات نيتروجينية كأول أكسيد النيتروجين (NO) وثاني أكسيد النيتروجين (NO₂). وجميع هذه النواتج باستثناء النيتروجين والماء تعتبر ملوثات للبيئة .

هناك طريقتان للتعبير عن مقدار الهواء المزود في عملية الاحتراق ، وهما :

- ١ — معامل التخفيف (D C dilution coefficient) .

٢ - النسبة المئوية للهواء الزائد (P E A percentage of excess air)

$$D C = \frac{\text{actual (A/F) ratio}}{\text{Theor. (A/F) ratio}} \quad (٥ - ٣)$$

$$P E A = \frac{(A/F)_{act} - (A/F)_{th}}{0.01 (A/F)_{th}} = 100 (DC - 1.0) \quad (٦ - ٣)$$

إن النسبة العملية للهواء / وقود $(A/F)_{act}$ لاحتراق ما ، يمكن تقديرها بواسطة التجارب العملية وذلك بتحليل الغازات العادمة بواسطة أجهزة خاصة مثل جهاز الكروماتوغراف (Chromatograph) وجهاز أورسات (Orsat apparatus) وغيرها .

٣ - ٢ - ٧ مبادئ حارقات الفحم الحجري : (Coal combustion systems)

١ - فرن ستوكر : (Stoker furnace)

يعتبر فرن ستوكر واحداً من أقدم معدات حرق الفحم الحجري التي لا تزال تستعمل حتى اليوم ، ولكون سعته محدودة فإنه لا يستعمل في تطبيقات القدرة الكبرى ولكنه يستعمل في إنتاج كميات محدودة من البخار في بعض العمليات . يُدخل الفحم المراد حرقه على شبكة ، ثم يتم إحراقه على فرش (قاعدة) ثابت (Stationary bed) وفي هذا الفرن يحرق الفحم المهشم أو المحطم (Crushed) ويتم إدخال جزء من الهواء يسمى (Primary air) من أسفل الفرش . يعمل على بدء عملية الاحتراق وتبريد الفرش - في نفس الوقت - ويتم إدخال هواء ثانوي (Secondary air) من الجهة العليا للفرش لإتمام عملية الحرق . هناك عدة أنواع من فرن ستوكر من أشهرها :

(أ) الشبكة المسلسلة والشبكة المتحركة : (Chain - grate and

traveling grate) : يتكون هذا النظام من شبكة حديدية ومتحركة

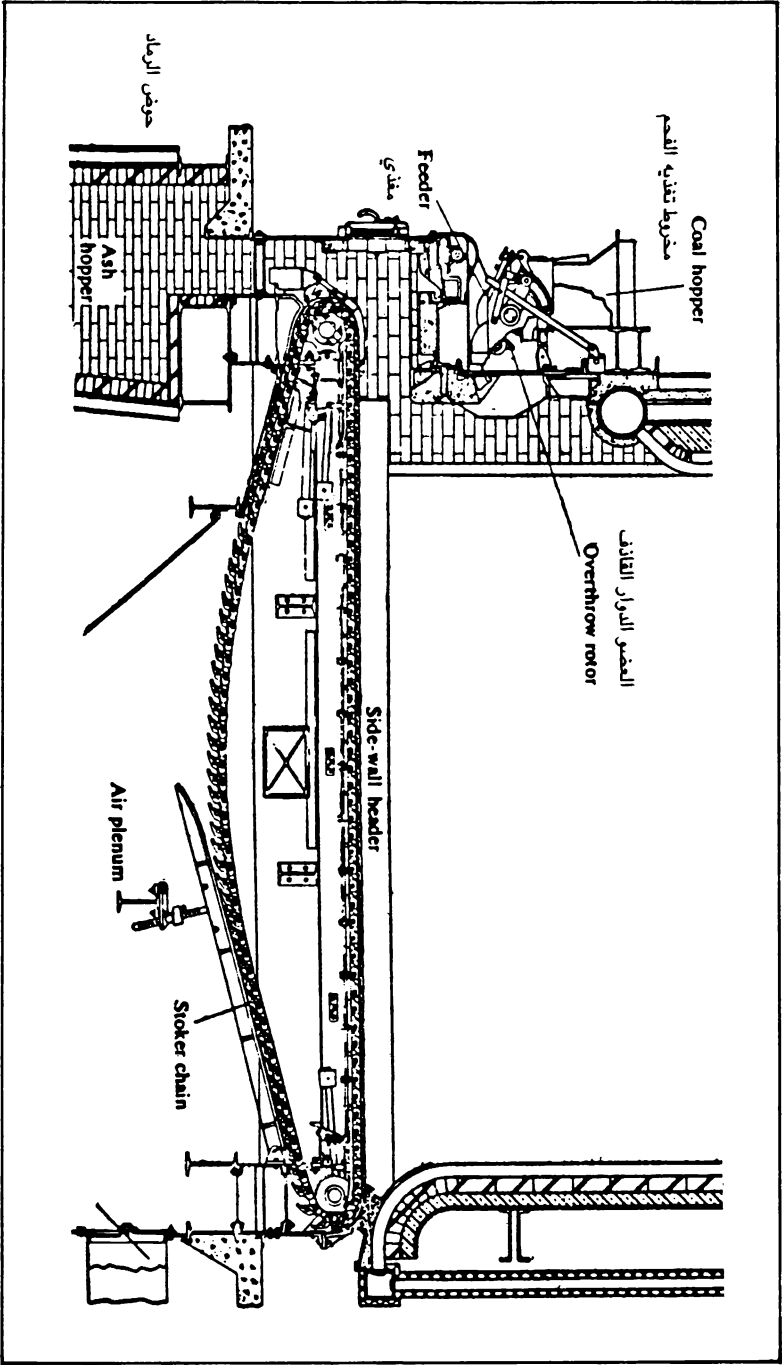
يتراكم عليها الفحم المهشم خلال عملية حرقه. ويعتبر هذا النوع أبسط أنواع أفران ستوكر وأقلها تكلفة ولكنه لا يصلح لحرق الفحم القابل للتكتل (Coking coals) لعدم وجود تقليب أو تحريك كافٍ للفحم المحترق على الشبكة .

(ب) الشبكة المهتزة : (Vibrating grate) وهذه مشابهة للشبكة المسلسلة ما عدا أن حركة الشبكة لا تكون في اتجاه ثابت كما هو الحال في الشبكة المسلسلة وكذلك فإن الشبكة تُهزّ خلال عملية الاحتراق .

(ج) الفرن ذو التغذية السفلية : (Under feed stoker) يتم إدخال الفحم إلى قاع الفرش من الأسفل بواسطة أحواض تغذية خاصة .

(د) الفرن — الموزع : (Spreader stoker) وهذا أحدث نوع من أنواع أفران ستوكر وأوسعها انتشاراً وذلك لبساطته وسعته العالية وتكلفته القليلة وعدم حساسيته لخصائص الفحم . وفي هذا الفرن يتم قذف الفحم إلى فرش الاحتراق بشكل عرضي (عمودي على اتجاه حركة الفرش) بواسطة مجاديف دوّارة (Rotating paddles) أو مراوح أو بواسطة موزع هوائي يُشغل بواسطة هواء أو بخار عالي الضغط .

يبين الشكل (٣ - ٥) صورة توضيحية للفرن الموزع مع نظام قذف الفحم .



الشكل (٣ - ٥)
الفرن الموزع

٢ — أفران الفحم المسحوق : (Pulverized - Coal Furnaces)

تحرق هذه الأفران الفحم المسحوق — بشكل ناعم جداً والمخلوط مع الهواء — بمشعل غازي ، (Gaseous torch) ويمكن لنظام الاحتراق هذا ، أن ينتج قدرات أكبر بكثير من تلك التي ينتجها فرن ستوكر ، وهو ذو استجابة سريعة (Fast response) لأنه لا يكون سوى كمية قليلة من الوقود غير المحترق في غرفة الاحتراق ، وفي هذا النظام فإن كمية الهواء الزائدة — المطلوبة للاحتراق — تكون أقل ، مما يقلل من تكون أكاسيد النيتروجين الملوثة (NO_x) .

ويمكن بهذه الطريقة حرق عدة أنواع من الفحم وأنواع أخرى من الوقود كالبترول والغاز ، ولوجود هذه الميزات ، فإن هذه الأفران تستعمل بكثرة في محطات القوى التي تستخدم الفحم الحجري كمصدر للوقود .

هناك بعض المساوئ لهذا النظام أهمها أن الفحم المسحوق يحتاج إلى آلة سحق (Pulverizer) للفحم . وهذه معقدة التركيب وتحتاج إلى قدرة كبيرة لتشغيلها ويلزمها صيانة دائمة ودقيقة ، بالإضافة إلى مشكلة الرماد المتطاير وما يسببه من تلوث ، مما يزيد في متطلبات الصيانة لنظام العادم . كذلك فإن تكاليف إنشاء هذا النظام باهظة ويتطلب أحجاماً كبيرة لعملية الاحتراق . وهناك عدة أنواع من آلات سحق الفحم ولكنها جميعاً تعتمد واحدة أو أكثر من عمليات السحق الثلاث الآتية :

١ — التهشيم (Crushing) .

٢ — الصدم (Impact) .

٣ — الفك أو الحك (Attrition) .

والحك عبارة عن عملية طحن أو سحق للفحم عن طريق احتكاك جزيئين من الفحم بعضهما مع بعض . وتعمل آلة السحق على سحق الفحم وتنعيمه إلى درجة عالية وتجفيفه قبل حرقه .

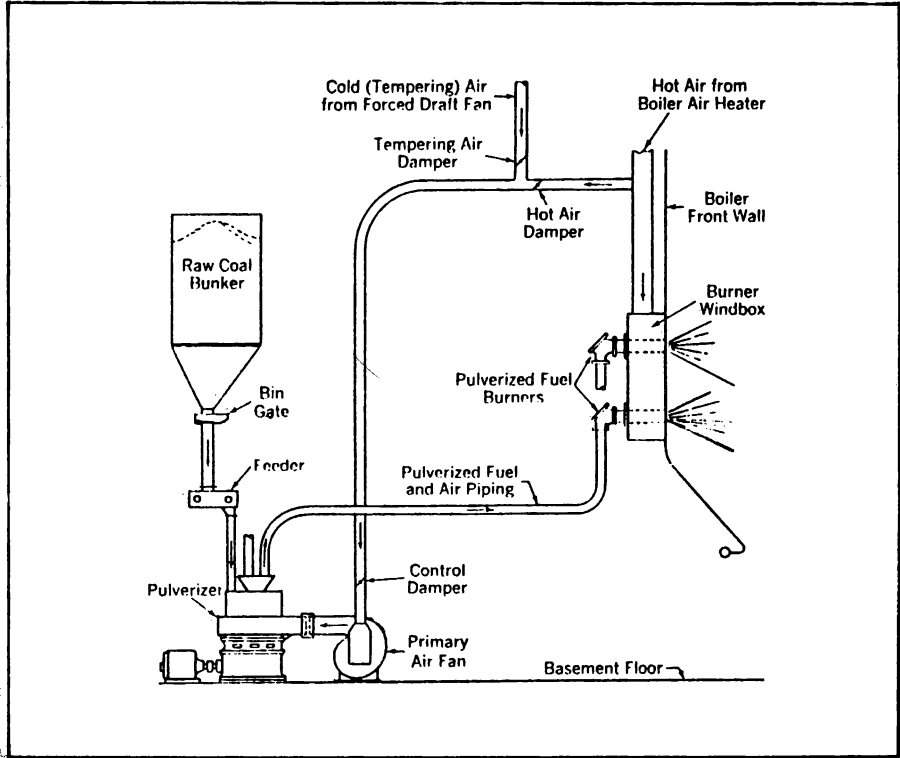
ويتم تسخين الهواء الأولي (Primary air) إلى درجة تتراوح ما بين ٢٦٠ — ٣١٥ °س ثم يُضخ بواسطة مروحة مستقلة عبر آلة السحق ليعمل على تجفيف الفحم المسحوق ، ثم ينقل من آلة السحق إلى الحارقة .

يبين الشكل (٣ - ٦) إحدى أنظمة الحرق المباشر للفحم المسحوق .

٣ - الأفران الدوامية : (Cyclone furnaces)

الفرن الدوامي عبارة عن نظام احتراق يستخدم غرف احتراق مستقلة يصل عددها إلى ١٦ غرفة في المحطات الكبيرة وجميع هذه الغرف تُغذي مرجلاً كبيراً بالغازات الساخنة . ويقوم هذا الفرن بحرق الفحم المهشم حيث يتم إدخال الفحم والهواء الأساسي بشكل مماسي (من المحيط) إلى غرفة اسطوانية كبيرة ومعزولة مما يعطيها حركة دوامية خلال عملية الاحتراق .

هناك مشكلتان رئيستان لنظام الاحتراق هذا :



الشكل (٣ - ٦)

نظام حرق مباشر للفحم المسحوق

(١) صعوبة حرق الفحم الحجري المحتوي على نسب منخفضة من

الكبريت بسبب مشاكل مُخلفات الاحتراق .

(ب) في هذا الاحتراق تكون درجة حرارة الاحتراق عالية مما يتسبب في تكون أكاسيد النيتروجين (NO_x) التي تعتبر ملوثات رئيسة للبيئة .

٤ - إحتراق الطبقات المخلخلة : (Fluidized bed combustion)

يعتبر هذا الاحتراق نوعاً حديثاً من أنظمة الاحتراق حيث يتم إدخال كل من الفحم المهشم والرماد والحجر الكلسي (Lime stone) أو الدولومايت (Dolomite) وخلطها جميعاً مع بعضها على فرش الاحتراق ، ثم يتم إدخال تيار هوائي بضغط معين من أسفل الفرش مما يؤدي إلى طفو (تعليق) هذه المواد في الهواء وبالتالي تسهيل عملية احتراقها. تُغمس أنابيب المراجل أو الأنابيب المراد تسخينها في الطبقة المخلخلة المشتعلة مما يحقق اتصالاً (تلامساً) مباشراً بين أسطح هذه الأنابيب وجزيئات الفحم المشتعل وهذا يؤدي إلى زيادة معدلات انتقال الحرارة بشكل كبير وتقليل المساحة اللازمة لوحدة الحرق ويؤدي كذلك إلى تخفيض درجة حرارة الاحتراق .

الميزة الهامة لهذا النظام من الاحتراق هي القدرة على التحكم في التلوث لأن درجة حرارة الاحتراق المنخفضة (٨٢٠ - ٩٥٠ °س) تمنع تكون أكاسيد النيتروجين (NO_x) الملوثة للجو، كذلك فإن إضافة الدولومايت (Calcium carbonate) أو الحجر الكلسي (Calcium carbonate) تؤدي إلى حدوث تفاعل بين الكالسيوم أو المغنيسيوم وثاني أكسيد الكبريت لتكوين سلفات الكالسيوم أو المغنيسيوم التي هي عبارة عن أملاح صلبة يمكن تجميعها من غرفة الاحتراق ، وبمعنى آخر فإن الكبريت الملوث للجو يتم التخلص منه ، مما يسمح بحرق فحم ذي محتوى عالٍ من الكبريت . والعيب الرئيس لاحتراق الطبقات المخلخلة هو أن هواء الحرق يجب أن يتم تزويده بضغط عالٍ مما يتطلب وجود ضاغطة أو مروحة ذات قدرة كبيرة .

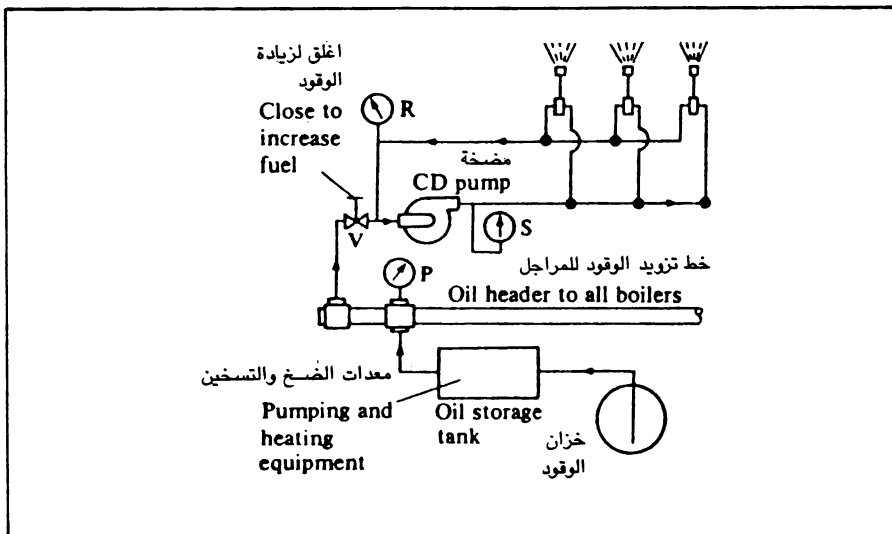
٣ - ٢ - ٨ أنظمة حرق الوقود الزيتي : (Oil-fired systems)

يتكون نظام حرق الوقود الزيتي (fuel - oil) في العادة من خزان للزيت ومعدات ضخ وتسخين وأنبوب تغذية رئيسي للزيت وحارقات (Burners) وخط وقود (زيت) كما هو مبين في الشكل (٣ - ٧) .

تُعد عملية حرق الوقود الزيتي أصعب من عملية حرق الوقود الغازي ولكنها

أسهل من عملية حرق الفحم الحجري ، ويجب تحضير الوقود في الحارقة بالنسب الصحيحة وخلطه مع الهواء قبل حرقه .

والتحضير قبل الحرق ضروري — بشكل خاص — في حالة حرق رواسب الوقود الزيتي (Residual fuel - oil) وهناك عدة طرق لتحضير الوقود الزيتي للحرق مثل التبخير أو التحويل للحالة الغازية بواسطة تسخين الزيت في الحارقة أو تذرير (Atomization) الزيت في تيار هوائي .



الشكل (٣ - ٧)
المكونات الرئيسية لنظام حرق الوقود الزيتي

وتستخدم عملية التبخير عادة في حالة حرق الوقود الزيتي الخفيف .

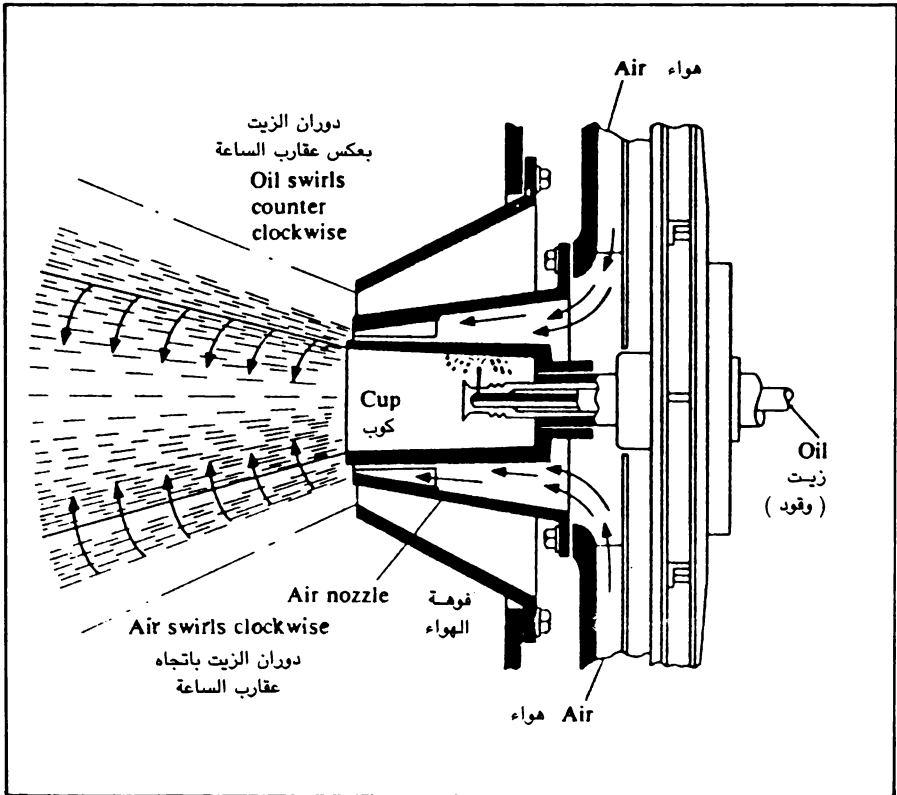
تتم عملية التذرير لقطرات الزيت باستعمال هواء عالي الضغط أو بخار عالي الضغط أو بواسطة تمزيق (Torn apart) طبقة الزيت الرقيقة (Film) بواسطة قوة الطرد المركزي .

إن عملية التذرير بواسطة الهواء أو البخار ملائمة في حالة الأحمال المتغيرة ويمكن بواسطة هذه العملية تغطية ساعات مختلفة بدون تغيير تركيبة جهاز التذرير .

أما التذيرير الميكانيكي فهو مناسب في حالة الأحمال الثابتة والسعات الكبيرة ولكن حدود السعة له محدودة .

يبين الشكل (٣ - ٨) حارقة الكوب الدوار (Rotary - cup burner) .

وتستخدم هذه الحارقة سرعات عالية تصل إلى ٣٥٠٠ دورة / دقيقة للكوب الدوار الأفقي، وذلك لإعطاء الزيت قوة دوامية (Spin) تُخرجه من الحافة (Rim) إلى تيار الهواء بواسطة قوة الطرد المركزي وهذه الحارقة الميكانيكية لها مجال سعة كبير (١ - ١٦) .



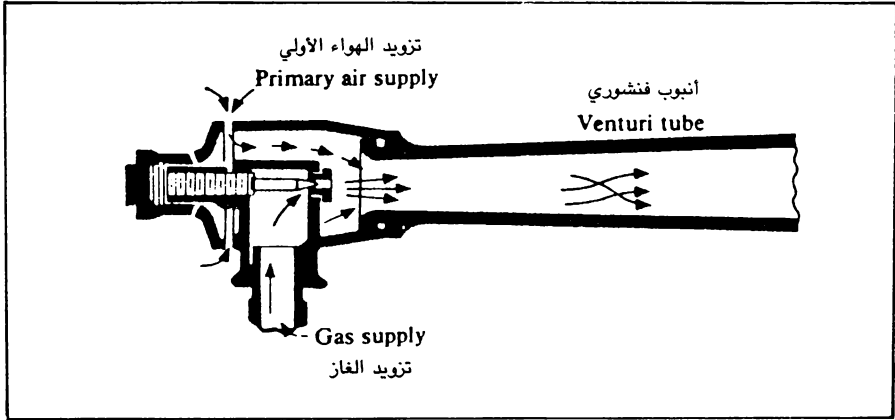
الشكل (٣ - ٨)
حارقة الكوب الدوار

٣ - ٢ - ٩ أنظمة حرق الوقود الغازي :

يعتبر الوقود الغازي من أسهل أنواع الوقود احتراقاً حيث انه لا يحتاج — في كثير من الأحيان — إلى تحضير قبل عملية الحرق . ويتم إعداد الوقود الغازي للحرق بخلطه مع الهواء بالنسب الصحيحة ، ثم إشعاله مباشرة، ويمكن عمل ذلك بعدة طرق .

١ — الحارقة الغازية الجوية : (Atmospheric gas burner)

يعتبر هذا النوع أحد الأنواع المألوفة والشائعة الاستخدام . ويتم في نظام الحرق هذا سحب الهواء الأولي اللازم إلى الحارقة بواسطة زخم (Momentum) الغاز في عملية تسمى بعملية السقط (Aspiration) . وتُشغّل هذه الأنظمة بشكل اعتيادي باستخدام نسب خلط للهواء الأولي / غاز تتراوح ما بين ٣٠ — ٧٠ ٪ في حين يتم سحب الهواء الثانوي اللازم لإكمال الاحتراق في الهواء الجوي المحيط بالحارقة مباشرة . يبين الشكل (٩ - ٣) حارقة غازية جوية نموذجية .

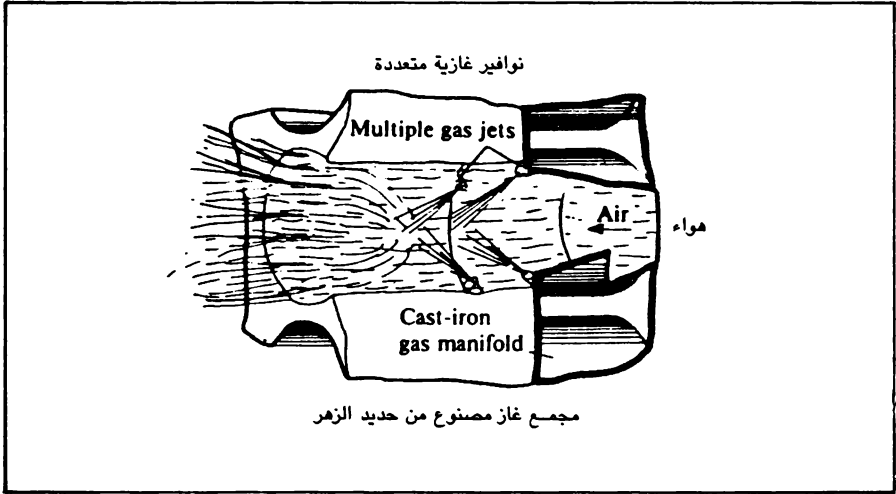


الشكل (٩ - ٣)
حارقة غازية جوية

٢ — الحارقة الغازية المقاومة للصهر : (Refractory gas burner)

يستخدم هذا النوع من الحارقات عادة في مولدات البخار، ويتم في هذا النظام سحب هواء الاحتراق مباشرة من الهواء الجوي المحيط بالحارقة التي

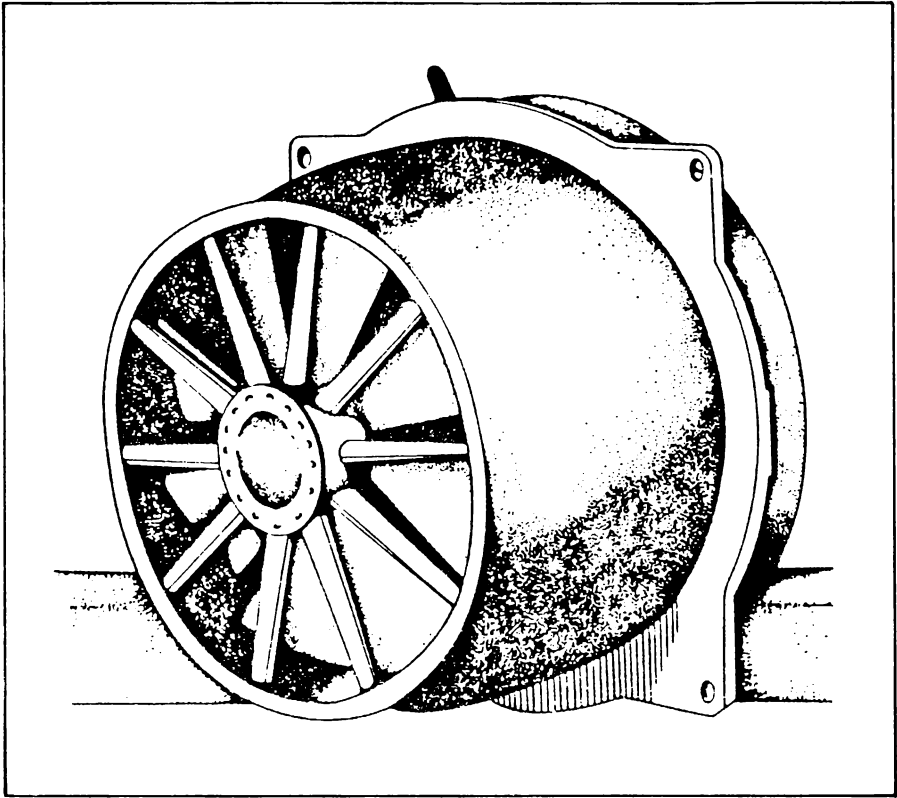
يتخللها عدة ثقب يندفع منها الغاز بقوة إلى تيار الهواء مما يؤدي إلى حدوث خلط جيد للغاز مع الهواء .. وبعد ذلك يتدفق الخليط عبر أنبوب معدني قصير مصنوع من معدن مقاوم للصهر لحمايته من درجات الحرارة المرتفعة . الشكل (٣ - ١٠) يبين إحدى أنواع الحارقات الغازية المقاومة للصهر .



الشكل (٣ - ١٠)
حارقة غازية مقاومة للصهر

٣ - الحارقة مروحية الخلط : (Fan - mix burner)

في نظام الاحتراق هذا ، يندفع كل من الهواء والغاز من فوهات مثبتة بزوايا معينة داخل وعاء مجوف دوار على شكل مقلاة يرتبط مع مروحة ، كما هو مبين في الشكل (٣ - ١١) . وتؤدي قوة اندفاع الهواء والغاز إلى دوران كل من الوعاء والمروحة التي تعمل على خلط الهواء بالغاز خلال دورانها .



الشكل (٣ - ١١)
الحارقة مروحية الخلط

٣ - ٣

الطاقة الحرارية من الشمس

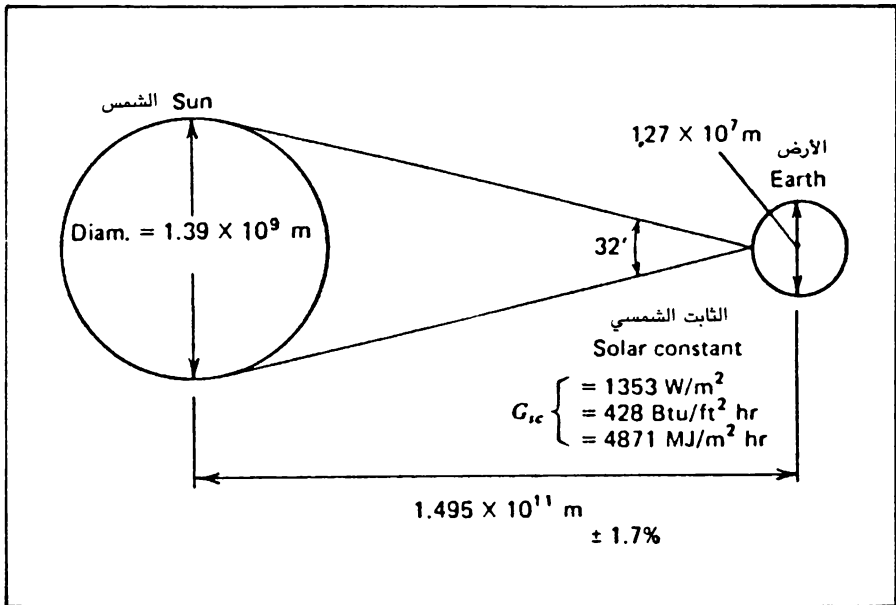
٣ - ٣ - ١ مقدمة :

الشمس عبارة عن كرة ملتهبة من الغازات الكثيفة يبلغ قطرها $1,39 \times 10^9$ متراً ومتوسط بعدها عن الأرض $1,5 \times 10^{11}$ متراً ودرجة حرارة سطحها الفعالة 5762 K كلفن (بينما تتراوح درجات حرارتها الداخلية ما بين $610 \times 10^8 - 610 \times 10^4$ كلفن . يبين الشكل (٣ - ١٢) رسماً تخطيطياً للعلاقات الهندسية بين الشمس والأرض .

يُعرف الثابت الشمسي (Solar constant) $G S C$ بأنه الطاقة المشعة من الشمس في وحدة الزمن والساقطة على وحدة مساحة معامدة لاتجاه الإشعاع الشمسي وتبعد مسافة مساوية لمتوسط بعد الأرض عن الشمس خارج نطاق الغلاف الغازي للكرة الأرضية . وقد دلت القياسات الحديثة التي أجرتها المركبات الفضائية على أن قيمة هذا الثابت تبلغ حوالي 1353 واط / متر مربع ، ونسبة الخطأ في هذه القيمة هي $\pm 1,5 \%$ ($G S C = 1353 \pm 1.5 \% \text{ W / m}^2$) .

وتعتبر الطاقة الشمسية أكثر مصادر الطاقة توافراً للجنس البشري ، وبالتحديد الطاقة الكهرومغناطيسية التي تبعثها الشمس ، وعلى الرغم من أن الطاقة الشمسية لا تستعمل كمصدر رئيس للطاقة في الوقت الحاضر إلا أن هناك بحوثاً وجهوداً مستمرة لاستغلال أو تسخير الطاقة الشمسية بشكل اقتصادي لتصبح مصدراً رئيساً للطاقة خصوصاً في حقل التبريد والتدفئة للمباني .

يمكن تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى أشكال أخرى للطاقة في ثلاث



الشكل (٣ - ١٢)
العلاقات المختلفة بين الشمس والأرض

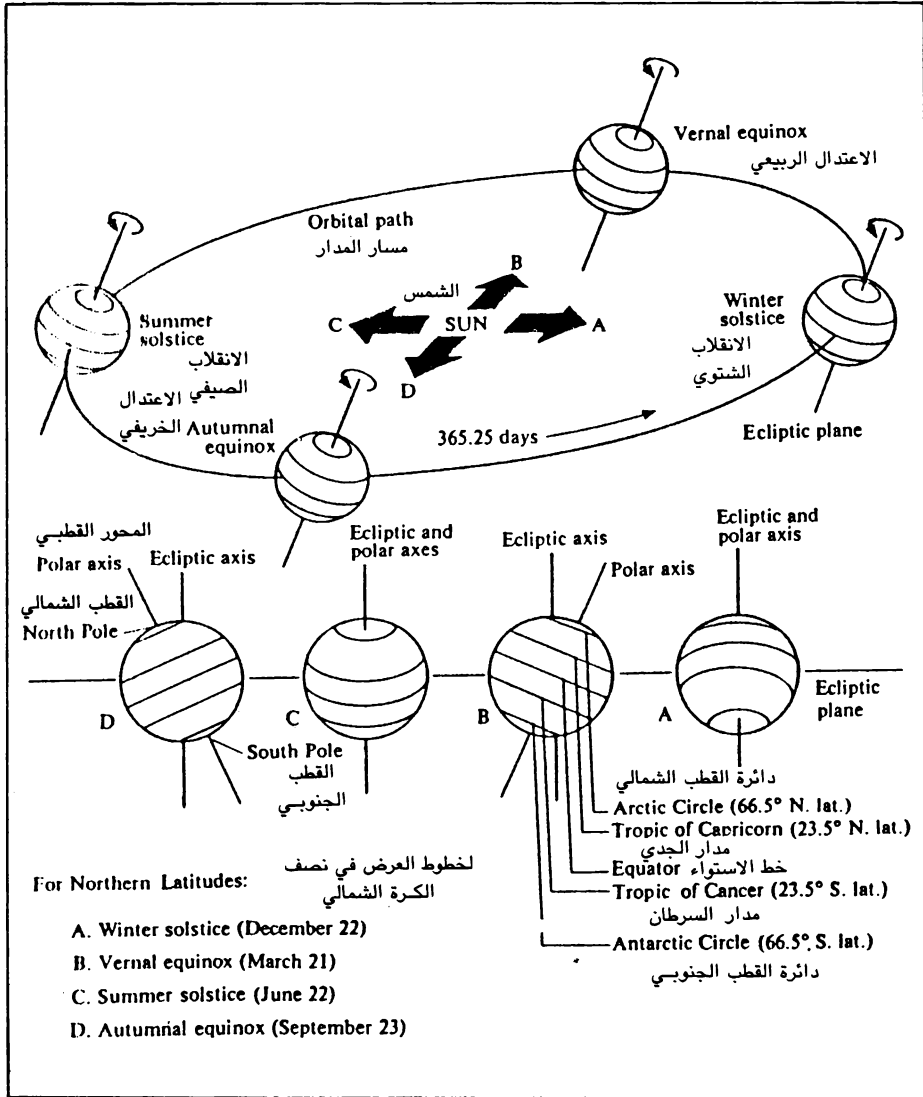
عمليات منفصلة، هي العملية الكيميائية الشمسية (Helio chemical) والعملية الكهربائية الشمسية (Helio electrical) والعملية الحرارية الشمسية (Helio thermal) .

فالعلاقة الكيميائية الشمسية إنما هي عملية التمثيل أو التركيب الضوئي التي هي أساس وقود المستحاثات. والعملية الكهربائية الشمسية هي عملية توليد الكهرباء بواسطة الخلايا الشمسية (Solar cells) . والعملية الحرارية الشمسية هي عملية امتصاص الإشعاع الشمسي وتحويل هذه الطاقة الإشعاعية إلى طاقة حرارية، وهذه العملية هي العملية التحويلية الوحيدة للطاقة الشمسية التي تصل كفاءتها إلى ١٠٠ ٪ .

٣ - ٣ - ٢ الأوقات الشمسية :

تدور الشمس حول الأرض في مدار يتخذ شكل القطع الناقص (Elliptical) كما هو مبين في الشكل (٣ - ١٢) وتكون الأرض في أقرب

أوضاعها من الشمس في ٢١ كانون الأول حيث يبلغ بعدها عن الشمس في هذا اليوم حوالي ١,٤٥ × ١١٠ متراً وتكون في أبعد أوضاعها عن الشمس في



الشكل (٣ - ١٣)

دوران الأرض حول الشمس واتجاهاتها المختلفة بالنسبة للأشعة الشمسية

٢٢ حزيران حيث يبلغ بعدها عن الشمس حوالي $1,54 \times 1110$ متراً .

يعرف الوقت الشمسي المتوسط (Mean Sun Time M S T) بأنه الوقت الشمسي المحلي (Local Sun Time L S T) لو كانت الأرض تدور حول الشمس بسرعة ثابتة، وبما أن مدار الأرض حول الشمس ليس دائرياً فإن هذا يعني أن سرعتها الدورانية حول الشمس ليست ثابتة، وهكذا فإن الشمس تظهر متقدمة أو متأخرة عن الوقت الشمسي المتوسط (M S T) وذلك تبعاً للوقت من السنة .

ويسمى الفرق بين الوقت الشمسي الحقيقي — يطلق عليه أيضاً اسم الوقت الشمسي الظاهر (A S T) — والوقت الشمسي المتوسط بمعادلة الزمن (Equation of time) .

وفي الواقع فإن معادلة الزمن ليست معادلة رياضية وإنما هي عبارة عن معامل تصحيح للزمن تعتمد قيمته على الوقت من السنة . الجدول (٣ - ١) يعطي بعض القيم لهذا المعامل لأوقات مختلفة من السنة .

ويمكن حساب الوقت الشمسي المتوسط بمعرفة خط الطول المحلي ، وبما أن الأرض تدور 360° في ٢٤ ساعة حول نفسها فإن كل درجة من درجات دورانها تقابل زمناً مقداره $(24 \times 60 / 360)$ أو ٤ دقائق . هناك خط طول وهمي يمر بالمركز التقريبي لكل نطاق زمني Time zone (لكل ١٥ درجة دورانية للأرض) يسمى بخط الطول القياسي (Standard meridian) لذلك النطاق الزمني وعلى هذا الخط فإن الوقت الشمسي المتوسط يكون مساوياً للوقت المحلي القياسي (Local Standard time) ويكون الوقت الشمسي متأخراً بمقدار (٤ دقائق / درجة دورانية للأرض) إلى الشرق من خط الطول القياسي أو متقدماً بنفس المقدار إلى الغرب من هذا الخط عن الوقت المحلي القياسي :

$$\text{الوقت الشمسي} = \text{الوقت المحلي القياسي} \pm [\text{درجات شرقاً} (+) \text{ أو درجات غرباً} (-)]$$

$$\text{من خط الطول القياسي} [(٤ \text{ دقائق})] \quad (٣ - ٦)$$

وبمعرفة الوقت الشمسي المتوسط فإنه يمكن حساب الوقت الشمسي الظاهر (Apparant solar time A S T) من المعادلة الآتية :

الوقت الشمسي الظاهر

$$= \text{الوقت الشمسي المتوسط} + \text{معادلة الزمن} \quad (٣ - ٧)$$

Parameters for solar calculations (on the 21st day of each month)

Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Day of the year	21	52	80	111	141	173	202	233	265	294	325	355
Declination, degrees	-19.9	-10.6	0.0	+11.9	+20.3	+23.45	+20.5	+12.1	0.0	-10.7	-19.9	-23.45
Equation of time, min	-11.2	-13.9	-7.5	+1.1	+3.3	-1.4	-6.7	-2.4	+7.5	+15.4	+13.8	+1.6
Solar noon	Late			Early		Late			Early			
A, Btu/h·ft ²	390	385	376	360	350	345	344	351	365	378	387	391
B, 1/m	0.142	0.144	0.156	0.180	0.196	0.205	0.201	0.177	0.160	0.149	0.149	0.142
C, dimensionless	0.058	0.060	0.071	0.097	0.121	0.134	0.136	0.122	0.092	0.073	0.063	0.057

A is the apparent solar irradiation at air mass zero for each month.

B is the atmospheric extinction coefficient.

C is the ratio of the diffuse to direct normal irradiation on a horizontal surface.

$$(1 \text{ w} / \text{m}^2 = 0.3173 \text{ Btu} / \text{h} \cdot \text{ft}^2)$$

الجدول (١ - ٣)
بعض المتغيرات اللازمة للحسابات الشمسية

حيث ان الوقت الشمسي (A S T) يستخدم لحساب بعض الزوايا الشمسية اللازمة لحسابات الطاقة الشمسية .

٣ - ٣ - ٣ الزوايا الشمسية : (Solar angles)

١ - زاوية الميل : (Declination angle)

تعرف زاوية الميل (δ) بأنها الزاوية المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على المحور القطبي في مستوى الأشعة الشمسية ، وتتراوح قيم (δ) ما بين صفر في ٢١ آذار (الاعتدال الربيعي) إلى + ٢٣,٤٥ في ٢٢ حزيران (الانقلاب الصيفي) وما بين صفر في ٢٣ أيلول (الاعتدال الخريفي) إلى - ٢٣,٤٥ في ٢٢ كانون أول (الانقلاب الشتوي) والقيم الشهرية لزاوية الميل (δ) ، معطاة في الجدول (٣ - ١) . [أنظر الشكل (٣ - ١٣) .

٢ - زاوية الارتفاع : (Altitude angle β_1)

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الشمسي والمسقط الأفقي لهذا الشعاع على سطح الأرض عند زاوية خط عرض معين (L) .

٣ - زاوية السميت : (Azimuth angle α_1)

وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للشعاع الشمسي وخط اتجاه الجنوب (Due-south) مقاسة باتجاه عقارب الساعة عند زاوية خط عرض معين (L) .

ويمكن حساب قيم (β_1) و (α_1) من المعادلتين التاليتين :

$$\sin \beta_1 = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (٣ - ٨)$$

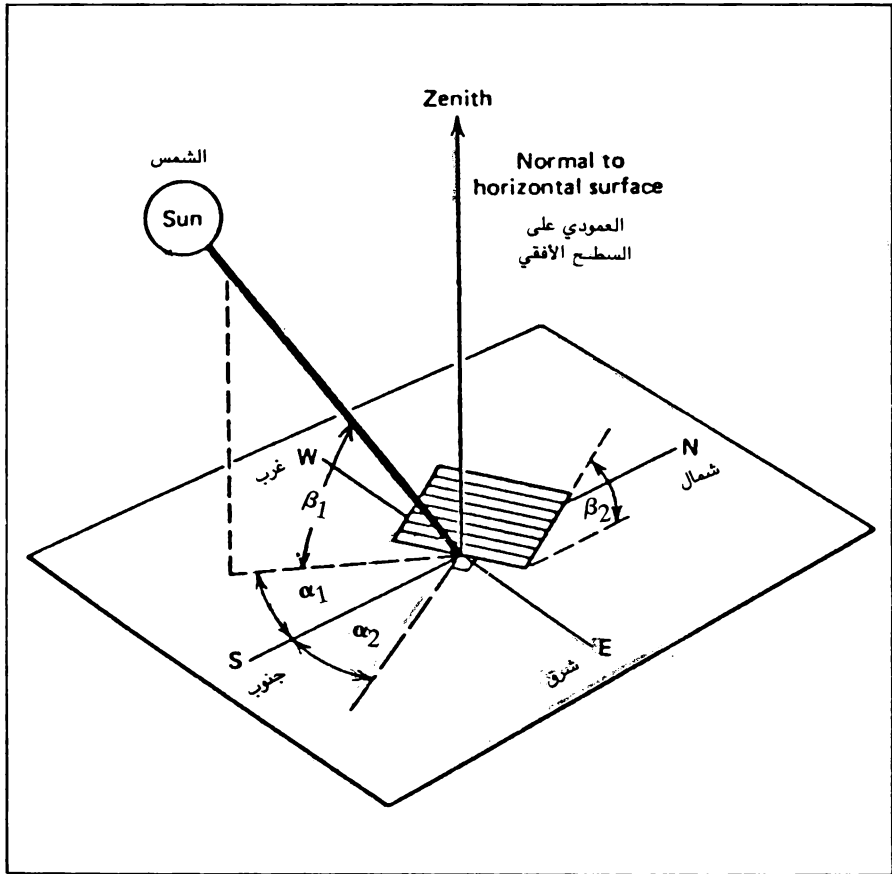
$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta_1} \quad (٣ - ٩)$$

حيث :

L : زاوية خط العرض (Latitude angle)

H : زاوية الساعة (Hour angle)

وهي كزاوية السميت قيمتها موجبة بعد الظهر وسالبة قبل الظهر ويمكن



الشكل (٣ - ١٣)
الزوايا الشمسية المختلفة

حسابها من المعادلة الآتية :

٠,٢٥ [عدد الدقائق قبل (-) أو بعد (+) الظهر للوقت الشمسي الظاهر

$$(١٠ - ٣) H = [A S T$$

يبين الملحق رقم (١) قيم كل من (α_1) و (β_1) عند خط عرض ٤٠ درجة شمالاً .

ولحساب الزاوية ϕ المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على سطح

معين فإنه من الضروري تعريف الزوايا الخاصة بهذا السطح شكل (٣ - ١٢) .

١ - زاوية السميت للسطح (α_2) وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للعمودي على السطح واتجاه مقاسه باتجاه عقارب الساعة .

٢ - زاوية الميل للسطح (Tilt angle β_2) وهي الزاوية المحصورة بين السطح والمستوى الأفقي .

وتعطى الزاوية (\emptyset) بالمعادلة الآتية :

$$\cos \emptyset = \sin \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \beta_1 \sin \beta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2)$$

(٣ - ١١)

إذا كانت قيمة ($\cos (\alpha_1 - \alpha_2)$) سالبة فإن هذا يعني أن الأشعة الشمسية لا تسقط على السطح بشكل مباشر .

٣ - ٣ - ٤ قيم الإشعاع الشمسي :

إن كمية الإشعاع الشمسي الساقطة على سطح معين هي حاصل ضرب الإشعاع المباشر الساقط على سطح معامد للأشعة الشمسية (I_{dn}) و ($\cos \emptyset$) . وتعتمد قيمة الإشعاع العمودي المباشر (I_{dn}) على سمك الغلاف الغازي الذي يقطعه الإشعاع بالإضافة إلى كميات بخار الماء والملوثات الموجودة في الجو . ويعبر عادة عن طول المسار الجوي بكتلة الهواء (m) التي تعرف بأنها النسبة للكتلة الجوية الموجودة في المسار الفعلي للإشعاع الشمسي المباشر عند موقع معين إلى تلك الكتلة الموجودة في المسار إذا كانت الشمس عمودية على ذلك الموقع ($\beta_1 = 90^\circ$) عند مستوى سطح البحر .

وخارج نطاق الغلاف الغازي للكرو الأرضية فإن ($m = 0$) وفي أي موقع آخر فإن ($m = 1 / \sin \beta_1$) .

يمكن حساب شدة الإشعاع العمودي المباشر (I_{dn}) من المعادلة الآتية :

$$I_{dn} = A e^{-(B / \sin \beta_1)}$$

(٣ - ١٢)

حيث :

A : شدة الإشعاع الشمسي الكوني الظاهر عند (W / m^2)

$$m = 0$$

B : معامل الانطفاء الجوي (1 / m)

يبين الجدول (٣ - ١) القيم الشهرية لكل من (A) و (B) بينما يبين الملحق رقم (٢) قيم المركبة العمودية المباشرة (I_{dn}) للإشعاع الشمسي عند خطوط عرض مختلفة .

ويعطى تدفق الطاقة الشمسية الكلي ($I_{t\phi}$) على سطح موجود في نطاق الكرة الأرضية عند أي ميل واتجاه لهذا السطح إذا كانت زاوية السقوط له مقدارها (ϕ) بالمعادلة :

$$I_{t\phi} = I_{dn} \cos \phi + I_{ds} + I_r \quad (٣ - ١٣)$$

حيث :

$I_{dn} \cos \phi$: المركبة المباشرة للأشعة الشمسية (W / m^2)

I_{ds} : المركبة المنتشرة أو المبعثرة للإشعاع الشمسي (W / m^2)

I_r : الإشعاع قصير (طول - الموجة) المنبعث من الأسطح الفضائية الأخرى غير الشمس (W / m^2)

وتعتمد شدة المركبة المباشرة الساقطة على سطح معامد للأشعة الشمسية (I_{dn}) على :

١ - الوقت من السنة .

٢ - الوقت من اليوم .

٣ - خط العرض .

٤ - الحالة الجوية .

وتعطى قيمة (I_{ds})

$$I_{ds} = C I_{dn} F \quad (٣ - ١٤)$$

حيث ان (C) هي النسبة بين المركبة المبعثرة إلى المركبة المباشرة للأشعة الشمسية الساقطة على سطح أفقي ((الجدول (٣ - ١))، و (F) هو معامل الزاوية بين السطح والفضاء، ويمكن حساب قيمة تقريبية لهذا العامل من المعادلة :

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} \quad (٣ - ١٥)$$

وتعطى كمية الطاقة الشمسية ($E_{t\emptyset}$) التي يمتصها سطح معين بالمعادلة :

$$E_{t\emptyset} = I_{t\emptyset} \epsilon \quad (٣ - ١٦)$$

حيث ان (ϵ) هي انبعاثية أو امتصاصية السطح للإشعاع الشمسي .

يعطي الجدول (٣ - ٢) قيم الامتصاصية لبعض الأسطح .

المادة	ϵ الإشعاع العادي	ϵ الإشعاع الشمسي
الطوب والاسمنت المسلح	0.85 — 0.95	0.65 — 0.77
الاسفلت	0.90 — 0.95	0.86 — 0.90
ورق السقوف	0.85 — 0.95	0.85 — 0.90
الالمنيوم	0.02 — 0.10	0.10 — 0.40
النحاس	0.02 — 0.15	0.30 — 0.50

الجدول (٣ - ٢)
إمتصاصية بعض الأسطح للإشعاع الحراري

مثال :

احسب كمية الطاقة الشمسية التي يمتصها سطح إحدى البنايات في الحادي والعشرين من شهر أيار عند الساعة الثانية عشرة ظهراً إذا كانت هذه البناية تقع في مدينة أربد — خط عرض ٣٢ شمالاً وخط طول ٣٦ شرقاً — وكان

السقف يواجه الجنوب ويميل بزاوية مقدارها ٤٥ درجة عن العمودي على سطح الأرض . (افترض ان السماء صافية)

زاوية خط العرض $L = 33^\circ$

خط الطول Longitude = 36° east

May 21 at 12 noon

زاوية ميل السطح عن المستوى الأفقي $\beta_2 = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$

زاوية السميت للسطح ($\alpha_2 = 0$) لأن السطح يواجه الجنوب .

لنأخذ خط الطول القياسي ٣٠ شرقاً (30 east) .

إذاً فالوقت الشمسي المتوسط (M S T)

$$M S T = 12:00 + [36 - 30] 0:04 = 12:24$$

(استعملنا الإشارة + لأن خط الطول المحلي لمدينة اربد يقع ٦ درجات شرق خط الطول القياسي)

الوقت الشمسي الظاهر (A S T)

$$A S T = M S T + E O T \quad (\text{معادلة الزمن})$$

من الجدول (٣ - ١) في ٢١ أيار

$$\delta = + 20.3$$

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104 \text{ W / m}^2$$

$$EOT = + 3.3 \text{ min}$$

$$B = 0.196 \frac{1}{m}$$

$$C = 0.121$$

$$AST = 12:24 + 3.3 \text{ min} = 12:27.3$$

زاوية الساعة (H)

$$H = 0.25 [12:27.3 - 12:00.0] = + 6.82^\circ$$

لاحظ أن الإشارة (+) لأن (A S T) بعد الظهر .

$$\sin \beta_1 = \cos 33^\circ \cos 6.82^\circ \cos 20.3^\circ + \sin 33^\circ \sin 20.3^\circ$$

$$\sin \beta_1 = 0.967$$

$$\beta_1 = 75.92^\circ$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos 20.3^\circ \sin 6.82^\circ}{\cos 75.92^\circ} = 0.4581$$

$$\alpha_1 = 27.26^\circ$$

$$\cos \emptyset = \sin 75.92^\circ \cos 45^\circ + \cos 75.92^\circ \sin 45^\circ \cos (27.26^\circ - 0^\circ)$$

$$\cos \emptyset = 0.8387$$

$$I_{dn} = 1104 e^{-0.196 / 0.967} = 901.5 \text{ W / m}^2$$

$$I_{ds} = C I_{dn} F$$

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} = \frac{1 + \cos 45^\circ}{2} = 0.853$$

$$I_{ds} = 0.121 \times 0.833 \times 901.5 = 93.1 \text{ W / m}^2$$

$$I_{t\emptyset} = I_{dn} \cos \emptyset = I_{ds}$$

(لاحظ أن I_r قد أهملت)

$$I_{t\emptyset} = 901.5 \times 0.8387 + 93.1 = 849.15 \text{ W / m}^2$$

$$E_{t\emptyset} = \epsilon I_{t\emptyset}$$

من الجدول (٣ - ٢) فإن قيمة (ϵ) للأسمنت المسلح هي :

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.1$$

$$E_{t\emptyset} = 0.71 \times 849.15 = 602.9 \text{ W / m}^2$$

مثال :

احسب مقدار الطاقة الشمسية — عند الساعة التاسعة صباحاً في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني — التي يمتصها سقف إحدى البنايات المغطى بورق السقوف والذي يميل عن الأفقي بزاوية مقدارها 40° ويواجه الجنوب الشرقي إذا علمت أن هذه البناية تقع على خط عرض 33° شمالاً وخط طول 82° غرباً . (افترض أن السماء صافية) .

$$\text{South east roof } \alpha_2 = - 45^\circ$$

$$L = 33^\circ, \beta_2 = 40^\circ$$

من الجدول (٣ - ١) في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني

$$\delta = - 19.9^\circ, E O T = - 11.2 \text{ min}$$

$$A = \frac{390}{0.3173} = 1230 \text{ W / m}^2, C = 0.058, B = 0.142 \frac{1}{m}$$

أقرب خط طول قياسي (75° غرباً)

Nearest Meridian 75° W

(صباحاً)

$$MST = 9:00 + 0:04 [75 - 82] = 9 - 0:28 = 8:32 \text{ A. M.}$$

$$AST = 8:32 + (- 0:11.2) = 8:20.2 \text{ A. M.}$$

$$H = [8:20.2 - 12:00] 0.25 = - 54.8^\circ$$

$$\sin \beta_1 = \cos 30 \cos (- 19.9) \cos (- 54.8) + \sin 30 \sin (- 19.9) = 0.2992$$

$$\beta_1 = 17.4^\circ$$

$$\sin \alpha_1 \frac{\cos (- 19.9) \sin (- 54.8)}{\cos 17.4} = - 0.805$$

$$\alpha_1 = - 53.6^\circ$$

$$\cos \emptyset = \sin 17.4 \cos 40 + \cos 17.4 \sin 40 \cos [- 53.6 - (- 45)]$$

$$\cos \emptyset = 0.8357$$

$$I_{dn} = 1230 e^{- (0.142 / \sin 17.4)} = 765 \text{ W / m}^2$$

$$F = \frac{1 + \cos 40}{2} = 0.833$$

$$I_{t\emptyset} = I_{dn} [\cos \emptyset + C F]$$

$$I_{t\emptyset} = 765 [0.8357 + 0.058 \times 0.883]$$

$$I_{t\emptyset} = 678.5 \text{ W / m}^2$$

$$E_{t\emptyset} = \epsilon I_{t\emptyset}$$

من الجدول (٣ - ٢)

$$\epsilon = \frac{0.85 + 0.9}{2} = 0.875$$

$$E_{t\phi} = 0.875 \times 678.5 = 593.7 \text{ W / m}^2$$

مثال :

احسب مقدار الطاقة الشمسية التي يمتصها الحائط الغربي لإحدى
البنائات الواقعة على خط عرض 45° شمالاً وخط طول 116° غرباً إذا كان هذا
الحائط يتكون من الطوب .

احسب هذه الطاقة عند الساعة السادسة والنصف مساءً في الحادي
والعشرين من شهر أيار (افترض أن السماء صافية) .

$$L = 45^\circ, \text{ Longitude } 116 \text{ West}$$

$$\text{Time } 6:30 \text{ P. M. May } 21$$

$$\text{Vertical Wall } \beta_2 = 90^\circ, \alpha_2 = 90^\circ$$

بما أن الحائط عمودي ، إذاً :

من الجدول (٣ - ١)

$$\delta = 20.3^\circ, E O T = 3.3^\circ$$

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104 \text{ W / m}^2$$

$$B = 0.196 \frac{1}{m}, C = 0.121$$

$$M S T = 6:30 + 0:04 (120 - 116] = 6:46.0 \text{ P. M.}$$

$$A S T = 6:46.0 + 0:3.3 = 6:49.3 \text{ P. M.}$$

$$H = 0.25 [6:49.3 - 12:00.0] 0.25 (409.3) = 102.3^\circ$$

$$\sin \beta_1 = \cos 45 \cos 20.3 \cos 102.3 + \sin 45 \sin 20.3$$

$$\beta_1 = 5.59^\circ$$

$$\sin \alpha_1 \frac{\cos 20.3 \sin 102.3}{\cos 5.95} = 0.921$$

$$\alpha_1 = 67.12^\circ$$

$$\cos \varnothing = \sin 5.95 \cos 90 + \cos 5.95 \sin 90 \cos (67.12 - 90)$$

$$\cos \varnothing = 0.97$$

$$\begin{aligned} I_{dn} &= A e^{- (B / \sin \beta_1)} \\ &= 167.7 \text{ W / m}^2 \end{aligned}$$

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} = 0.5$$

$$I_{t\varnothing} = I_{dn} (\cos \varnothing + C F) = 167.7 (0.917 + 0.121 \times 0.5)$$

$$I_{t\varnothing} = 257.9 \text{ W / m}^2$$

من الجدول (٢ - ٣)

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.71$$

$$E_{t\varnothing} = \epsilon I_{t\varnothing} = 183.1 \text{ W / m}^2$$

٣ - ٤

التطبيقات العملية

للطاقة الحرارية من الشمس

يتم استغلال الطاقة الحرارية من الشمس بشكل مباشر بواسطة المجمعات والمركّزات واللاقط الشمسية، وأهم التطبيقات في هذا المجال :

١ - اللواقط الشمسية : (Solar Collectors)

وتستخدم هذه اللواقط لتسخين المياه من أجل الاستعمال المنزلي، ويعتبر هذا التطبيق من التطبيقات ذات درجة الحرارة المنخفضة حيث لا تزيد درجة حرارة الماء المسخن عن ١٠٠°س ، ولكن في بعض اللواقط التي تُستخدم مع مركّزات (Concentrators) فإن درجة الحرارة قد تزيد عن ١٠٠°س .

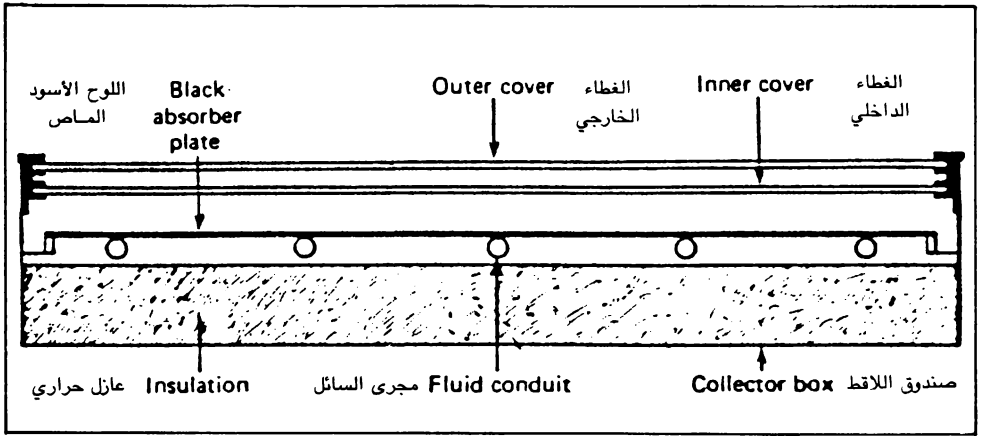
يبين الشكل (٣ - ١٤) أجزاء اللاقط الشمسي الأساسية .

٢ - الأفران الشمسية :

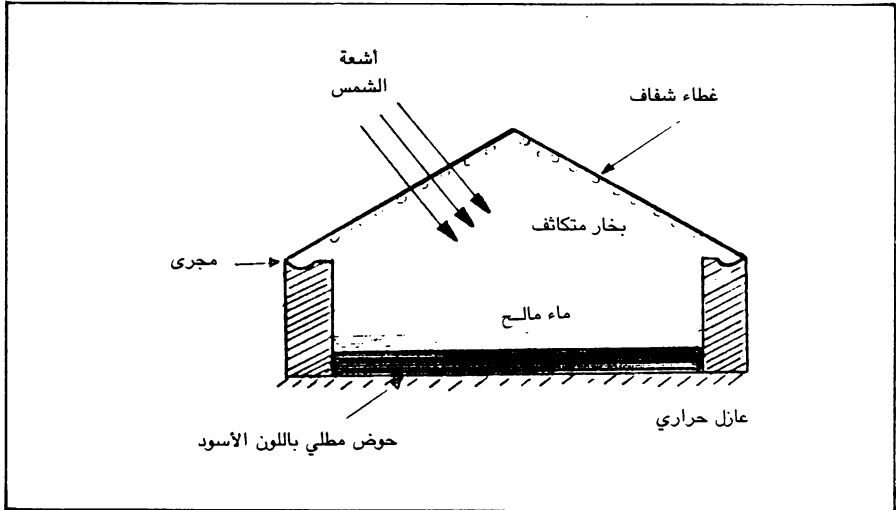
ويمكن بواسطتها الحصول على درجات حرارة مرتفعة تصل إلى ٢٠٠°س أو أكثر وذلك باستعمال المرايا المقعرة والعدسات .

٣ - تحلية وتنقية المياه : (Water Desalination)

تمرر المياه المراد تحليتها خلال مجمعات شمسية مغلقة وهذه المجمعات عبارة عن أغطية أو سقوف بلاستيكية (أو غيرها) شفافة، وعند نهاية هذه السقوف المائلة من الأسفل، مجاري (Troughs) لتجميع الماء المقطر. أما قاعدة المجمع (الحوض Basin) - الشكل (٣ - ١٥) - فتكون مطلية باللون الأسود الذي يمتص أكثر من ٩٥ ٪ من الأشعة الشمسية، ويكون الماء المالح موجوداً على القاعدة بعمق (طبقة) قليل وتكون الأغشية الشفافة ذات درجات حرارة أقل من درجة حرارة سطح الماء، وذلك بسبب عدم امتصاصها للأشعة الشمسية، ولهذا فإن



الشكل (٣ - ١٤)
مكونات الالاقط الشمسي



الشكل (٣ - ١٥)
الأجزاء الأساسية لإحدى وحدات تقطير المياه

الماء المتبخر (بخار الماء) يتكاثف على هذه السطوح الباردة نسبياً، وبسبب وجود الميل فإن الماء المتكاثف يسيل باتجاه القنوات أو المجاري في الأسفل التي تعمل على تجميعه .

٤ — تدفئة وتبريد المباني :

يعد هذا التطبيق من أكثر التطبيقات نجاحاً وأكثرها اقتصاداً في مجالات استخدام الحرارة الشمسية. في هذا التطبيق يتم بناء مباني خاصة سقوفها مكونة من طبقات بلاستيكية لها قابلية تجميع وتركيز الأشعة الشمسية، وتمر من خلال هذه الطبقات أنابيب الماء الذي يسخن ثم ينقل إلى كافة أرجاء المنزل للاستعمال بصورة مباشرة كماء حار أو للاستعمال من قبل نظم التدفئة ، أما في حالة التبريد فهناك حاجة إلى توليد قدرة لتشغيل أنظمة التبريد أو تطوير أنظمة كيميائية خاصة بذلك، ولهذا تعد عملية التبريد أصعب من عملية التدفئة من الناحية التكنولوجية .

٥ — الطباخات الشمسية :

حيث بالإمكان استعمال مرايا مقعرة بلاستيكية لتركيز الأشعة للحصول على درجات حرارة مرتفعة يمكن استعمالها في الطبخ، وكذلك بالإمكان استعمال غرف خاصة (مُجمعات) لتجفيف الحبوب والفواكه وأوراق التبغ .

أما أهم الاستعمالات غير المباشرة للطاقة الشمسية فهي استعمال أشعة الشمس لتوليد بخار الماء أو غيره من السوائل في أنظمة مغلقة حيث يمرر هذا البخار خلال توربينات خاصة تولد طاقة ميكانيكية يتم تحويلها بواسطة مولدات لإنتاج الطاقة الكهربائية. وهناك الآن مشاريع كثيرة في العالم لتوليد الطاقة الكهربائية بهذه الطريقة .



الفصل الرابع

إنتاج الطاقة الميكانيكية

٤ - ١

تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية

٤ - ١ - ١ محركات دورة رانكن

يبين الشكل (٤ - ١) المكونات الرئيسة لنظام محرك بخاري بسيط، حيث يُبخر السائل في مرجل، ثم يسمح له بالتمدد في ممدد (Expander) يُنتج شغلاً ميكانيكياً. ويكون هذا الممدد عادة عبارة عن آلة ترددية أو توربين، وبعد التمدد يعاد البخار إلى المرجل بواسطة مضخة تغذية بعد تكثيفه إلى ماء في المكثف حيث يُصرف جزء بسيط من شغل الممدد في تشغيل مضخة التغذية .

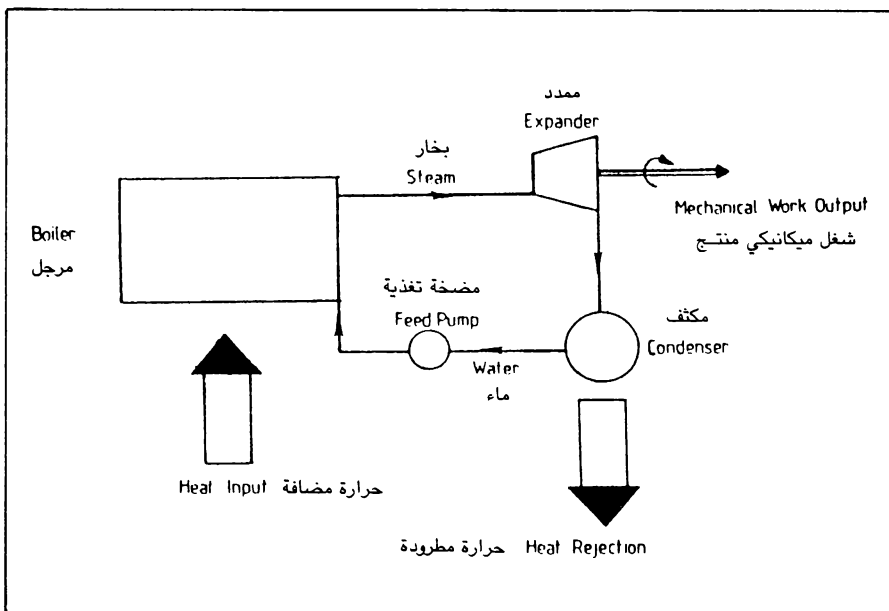
وفي العادة ، فإن الشغل المبذول لتشغيل مضخة التغذية يهمل في حسابات هذه الدورة . ولفهم أداء دورة رانكن البخارية فإنه من الضروري دراسة الحالات (الأطوار) المختلفة للبخار .

١ - البخار المشبع : (Saturated Vapour)

عند وضع كمية من الماء في وعاء مغلق ومفرغ من الهواء فإن الحيز الخاوي فوق الماء سيمتلئ ببخار الماء .

يعتمد الضغط النهائي الثابت الذي يصل إليه بخار الماء على درجة الحرارة فقط ، ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المشبع وعلى ضغط هذا البخار اسم ضغط البخار المشبع .

عند درجة حرارة الغرفة العادية فإن ضغط البخار المشبع للماء يكون منخفضاً. فعلى سبيل المثال عند درجة حرارة مقدارها ١٥°س يكون ضغط البخار المشبع للماء حوالي ١٧٥٠ نيوتن / م^٢ أو ما يعادل ٠,٠١٧ ضغط جوي .



الشكل (٤ - ١)
المكونات الأساسية لمحرك رانكن البسيط

عند ازدياد ضغط البخار المشبع فإن كثافة البخار تزداد تبعاً لذلك كما هو مبين في الجدول (٤ - ١) والذي يبين أيضاً العلاقة بين درجة الحرارة وضغط البخار المشبع .

٢ - البخار المحمص : (Superheated Vapour)

إذا عزلنا كمية من بخار الماء المشبع عن سطح الماء ورفعنا درجة حرارتها فإن هذه الكمية في البخار تتصرف كغاز. في هذه الحالة فإن ضغط البخار لا يعتمد فقط على درجة الحرارة ، بل يعتمد أيضاً على حجم الوعاء المحتوي لهذا البخار .

ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المحمص .

٣ - البخار الرطب : (Wet Vapour)

إذا بُردت كمية معزولة من البخار المشبع فإن جزءاً من البخار سيكثف وسينخفض الضغط تبعاً لذلك . يعرف الخليط (المزيج) الناتج عن عملية

Temperature °C	Pressure bar	Vapour density kg/m ³	Vapour specific volume, m ³ /kg
0.01	0.00611	0.00485	206
20	0.023	0.0175	57.8
30	0.0424	0.0304	32.9
40	0.0737	0.053	19
60	0.199	0.13	7.7
80	0.474	0.29	3.4
100	1.01	0.625	1.6
120	2.0	1.14	0.88
150	4.8	2.56	0.39
200	16.0	8.13	0.123
250	40.0	20.4	0.049
300	86.0	46.3	0.0216
350	166	115	0.0087
374.15*	221.20	315	0.00317

*Critical Point
1 bar = 10⁵Pa
1 atm = 1.013 bar

الجدول (٤ - ١) خصائص البخار المشبع

التكثيف الجزئي لبخار الماء باسم البخار الرطب، في حين يطلق اسم كسر الجفاف X (Dryness fraction) على نسبة الكتلة للبخار الموجودة في المزيج بحالتها الغازية .

$$\text{كسر الجفاف (X)} = \frac{\text{كتلة البخار في الحالة (الطور) الغازية}}{\text{كتلة الخليط الكلية}}$$

للسائل المشبع $X = 0$

للبخار الرطب $0 < X < 1.0$

للبخار المشبع $X = 1.0$

تعد عملية تسخين سائل ما عند ضغط ثابت عملية هامة في المحركات الحرارية ، فعند تسخين كمية من الثلج عند ضغط جوي فإن هذه الكمية ستذوب وتتحول إلى ماء عند درجة حرارة ثابتة صفر° س ، ثم تبدأ درجة حرارة الماء بالارتفاع حتى تصل إلى ١٠٠° س حيث يبدأ الماء بالتحويل إلى بخار عند نفس الدرجة حتى تتحول الكمية بأكملها إلى بخار ، ثم تبدأ درجة حرارة البخار بالارتفاع بعد ذلك مع استمرار عملية التسخين .

تسمى كمية الحرارة المزودة أو المكتسبة في عملية ما عند ضغط ثابت بالانتالبي. وفي الديناميكا الحرارية يرمز للانتالبي النوعية (J / kg) عادة بالرمز (h) — يطلق على الانتالبي أحياناً اسم المحتوى الحراري — .

تعرف انتالبي الانصهار أو الحرارة الكامنة للانصهار بأنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة للمادة في حالتها الصلبة إلى حالتها السائلة، وتعرف الانتالبي التبخر أو الحرارة الكامنة للتبخر بأنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة للمادة من حالتها السائلة إلى حالتها الغازية . الشكل (٤ - ١٢) و (٤ - ٢) يبين حالات البخار الثلاثة على مخططي درجة الحرارة — الانتالبي (T - h) ودرجة الحرارة — الانتروپيا (T - S) .

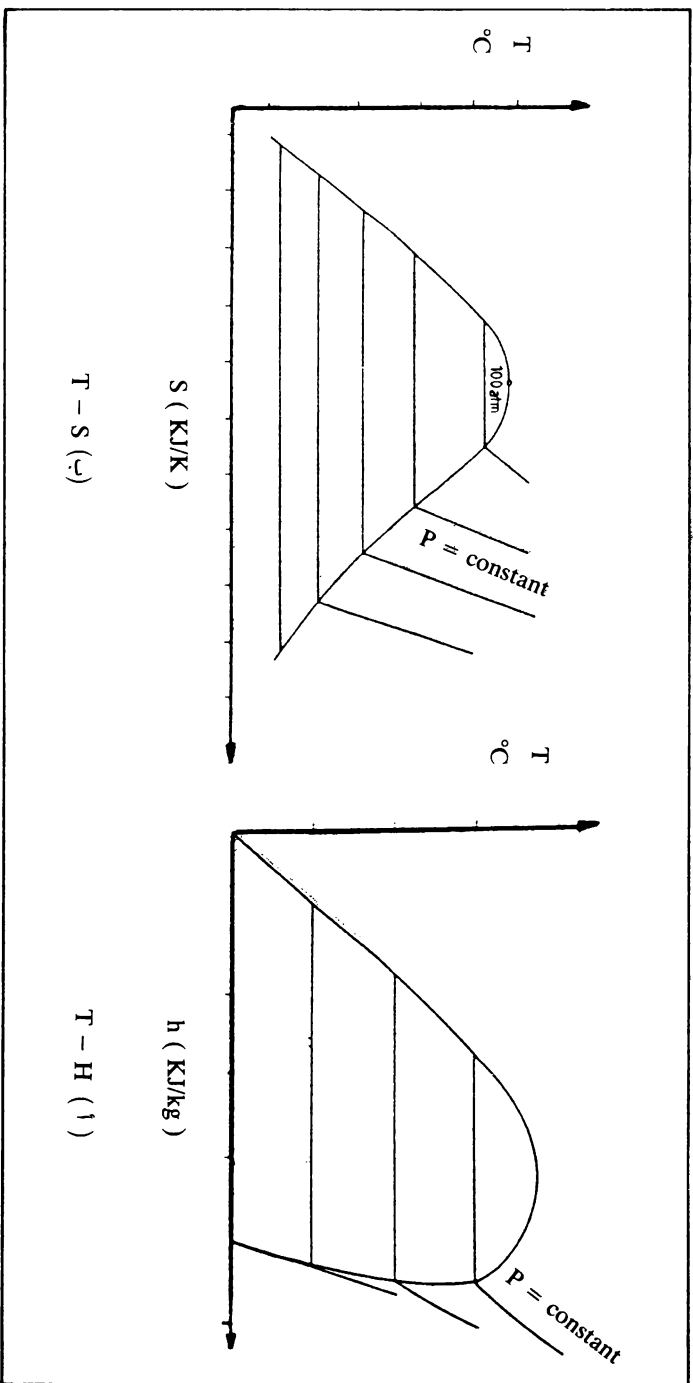
(١) المحرك البخاري الترددي : (Reciprocating steam engine)

يعتبر المحرك البخاري الترددي واحداً من أقدم المحركات العاملة على دورة رانكن .

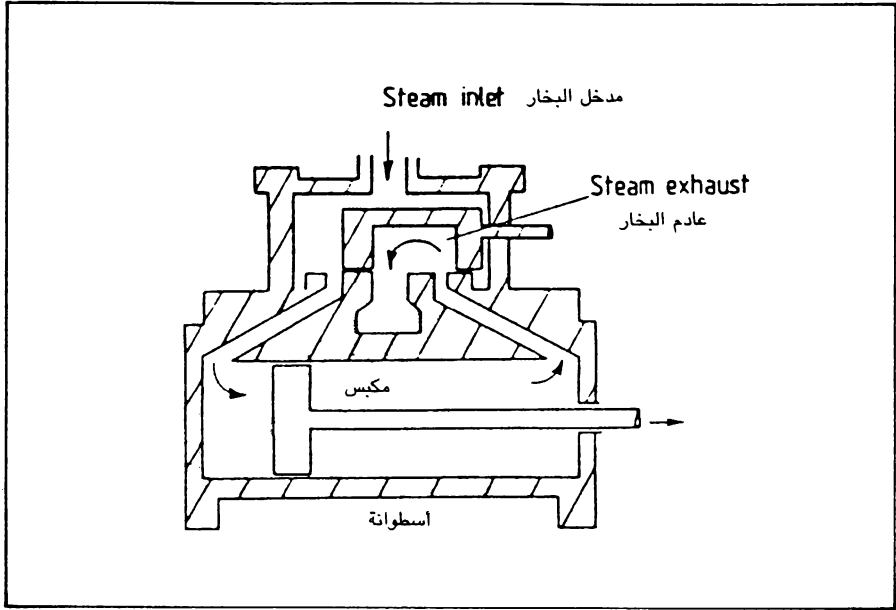
يتكون هذا المحرك أساساً من اسطوانة بداخلها مكبس يتحرك حركة ترددية . يتم إنجاز الشغل في هذا المحرك بفعل حركة المكبس الترددية الناتجة عن الفرق في الضغط بين داخل الاسطوانة (ضغط البخار المرتفع) وخارجها (الضغط الجوي). الشكل (٤ - ٣) يبين رسماً تخطيطياً لممدد مزدوج الحركة (Double acting expander) محرك بخاري ترددي .

(ب) التوربين البخاري :

كما هو مبين في الشكل (٤ - ٤) فإن الأجزاء الرئيسة للتوربين البخاري هي المرجل والتوربين والمكثف ومضخة التغذية ، أما الدورة التيرموديناميكية فتتضمن الإجراءات المثالية التالية :



الشكل (٤ - ٧)
مخطط درجة الحرارة - الانتالبي ودرجة الحرارة - الانتروبي



الشكل (٤ - ٣)
ممدد مزدوج الحركة

١ - (١ → ٢) انضغاط ايزونتروبي ($\Delta S = 0$) في المضخة يتطلب شغلاً مقداره (W_p) .

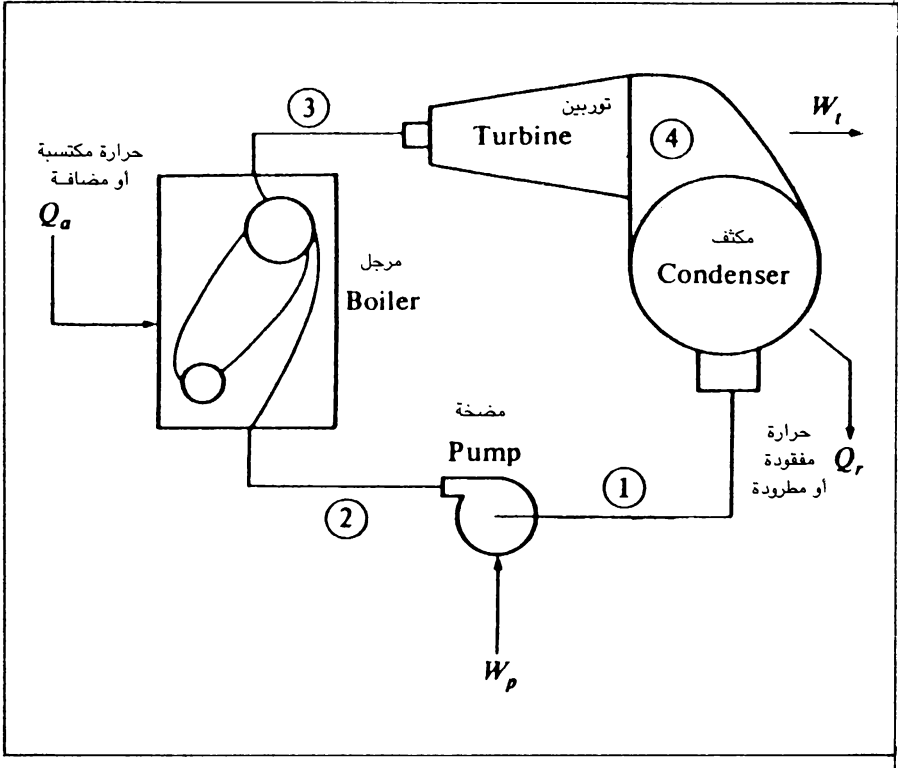
٢ - (٢ → ٣) اكتساب حرارة من الوسيط العامل في المرجل مقدارها (q_a) .

٣ - (٣ → ٤) تمدد ايزونتروبي في التوربين يُنتج شغلاً مقداره (W_t) .

٤ - (٤ → ١) فقد حرارة في المكثف عند ثبات الضغط مقدارها (q_r) .

وهذه الإجراءات المثالية (ايزونتروبية) الأربعة مبينة على مخطط (T - S)
(الشكل (٤ - ٥)) .

وتسمى الدورة التيرموديناميكية المكونة من هذه الإجراءات بدورة رانكن .
وكما هو مبين في الشكل (٥ - ٤) هناك حالتان لهذه الدورة :



الشكل (٤ - ٤)
الأجزاء الرئيسية (دورة رانكن)

١ — اكتساب البخار للحرارة في المرجل حتى يصل إلى درجة الإشباع فقط (3') وفي هذه الحالة فإن الدورة هي (1 2 3' 4') .

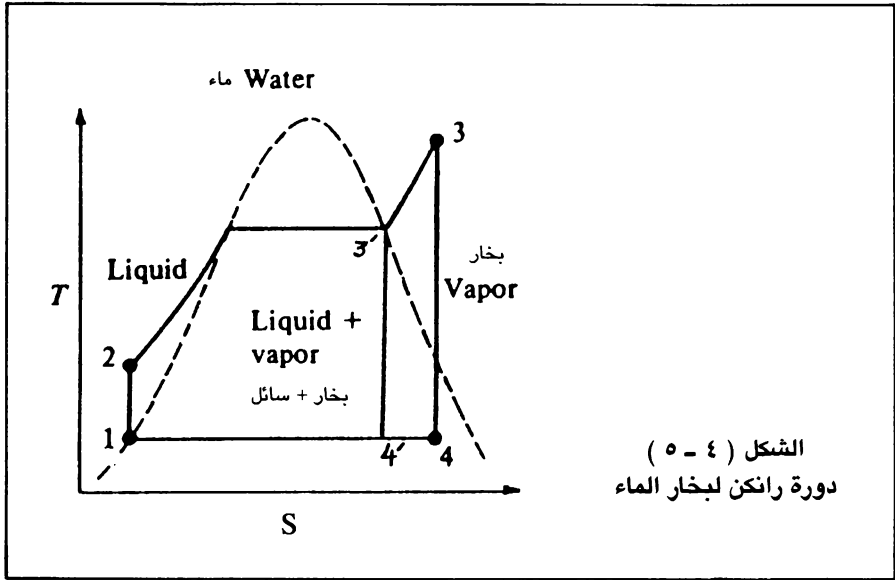
٢ — اكتساب الحرارة في المرجل حتى يصل البخار إلى درجة التخميص (3) وفي هذه الحالة فإن الدورة هي (1 2 3 4) .

شغل التوربين :

$$W_t = h_3 - h_4 \text{ or } W_t = h_{3'} - h_{4'} \quad (١ - ٤)$$

شغل المضخة (اللازم لتشغيل المضخة) :

$$W_p = h_2 - h_1 \approx v_1 (P_2 - P_1) \quad (٢ - ٤)$$



حيث :

$$v_1 = 1/\rho_1 : \text{الحجم النوعي للسائل (م}^3 \text{ / كغم) .}$$

$$\rho_1 : \text{كثافة السائل (كغم / م}^3 \text{) .}$$

$$P : \text{الضغط (نيوتن/م}^2 \text{) .}$$

الشغل الصافي :

$$W_n = W_t - W_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (٤ - ٣)$$

$$= (h_3 - h_4) - v_1 (p_2 - p_1)$$

الكفاءة الحرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} \quad (٤ - ٤)$$

أو :

$$\eta_{th} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad (٤ - ٥)$$

بإهمال شغل المضخة (W_p) :

$$W_n = h_3 - h_4 \quad (٤ - ٦)$$

$$\eta_{th} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad (٤ - ٧)$$

مثال :

في دورة رانكن بسيطة كان أقصى ضغط وأقصى درجة حرارة في الدورة هما ٧٠ بار و ٥٤٠°س وأقل ضغط في الدورة هو ٠,١ بار. بافتراض أن جميع الإجراءات مثالية (أيزونتروبية) .

وأن :

$$(h_1 = 191.8 \text{ KJ /kg}) \text{ و } (h_3 = 3507 \text{ KJ /kg}) \text{ و } (h_4 = 2389 \text{ KJ /kg})$$
$$\text{ و } (v_1 = 0.101 * 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}) .$$

احسب :

- ١ — شغل التوربين .
- ٢ — شغل المضخة .
- ٣ — الشغل الصافي .
- ٤ — الحرارة المكتسبة .
- ٥ — الحرارة المفقودة .
- ٦ — الكفاءة الحرارية للدورة .

$$1 — W_t = h_3 - h_4 = 3507 - 2389 = 1118 \text{ KJ / kg}$$

$$2 — W_p = v_1 (p_2 - p_1) = 0.101 * 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$(70 - 0.1) * 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{1}{1000} = 7.06 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$3 — W_n = W_t - W_p = 1118 - 7.06 = 1110.94 \text{ KJ / kg}$$

$$4 \text{ — } q_a = h_3 - h_2$$

$$h_2 = h_1 + v_1 (p_2 - p_1) = 191.8 + 7.06 = 198.86 \text{ KJ/ kg}$$

$$q_a = 3507 - 198.86 = 3308.14 \text{ KJ/ kg}$$

$$5 \text{ — } q_r = h_4 - h_1 = 2389 - 191.8 = 2197.2 \text{ KJ/ kg}$$

$$6 \text{ — } \eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} = \frac{1110.94}{3308.14} = 0.336$$

يُستخدم الماء كوسيط عامل في دورات القدرة البخارية (دورات رانكن) في أغلب الأحيان ولكنه بالإمكان استخدام موائع أخرى كالزئبق والبوتاسيوم والصوديوم والأمونيا وبعض المركبات العضوية .

يمكن تعديل دورة رانكن البسيطة وذلك بإعادة تسخين البخار في المرجل بعد تمدد جزئي في التوربين إلى نفس درجة حرارته السابقة قبل انتهاء التمدد ثم يعاد بعد ذلك إلى التوربين لإكمال عملية التمدد كما هو مبين في الشكل (٤ - ٦) .

الإجراءات المثالية لدورة إعادة التسخين مبينة في الشكل (٤ - ٧) على مخطط T - S حيث ان الإجراء (٤ → ٥) هو إجراء إعادة التسخين .

شغل التوربين :

$$W_t = (h_3 - h_4) = (h_5 - h_6) \quad (٨ - ٤)$$

شغل المضخة :

$$W_p = (h_2 - h_1) \quad (٩ - ٤)$$

الشغل الصافي :

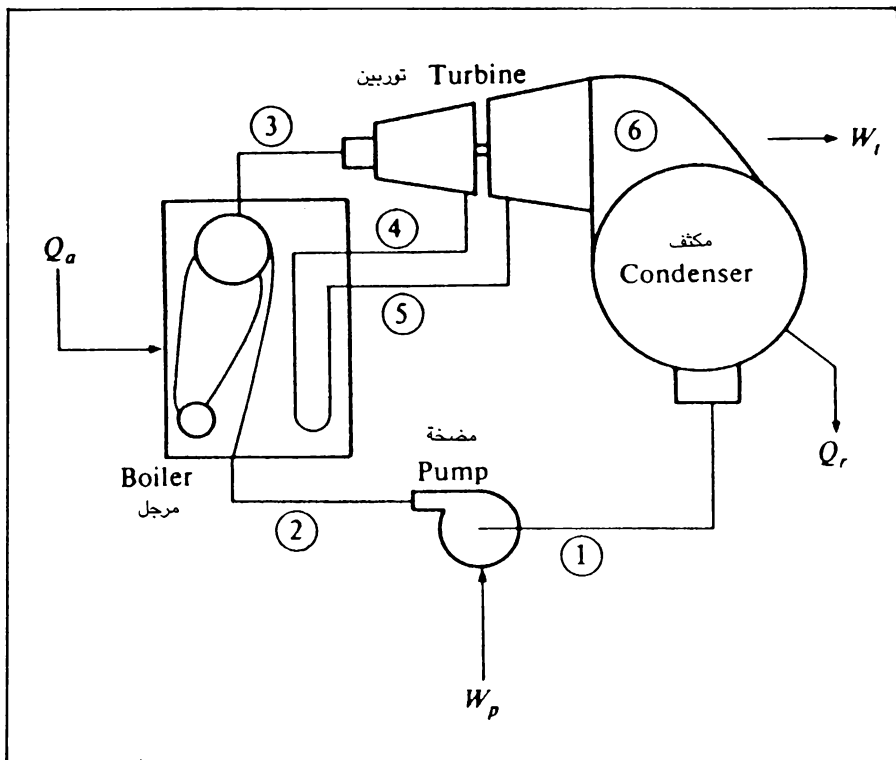
$$W_n = W_t - W_p = h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6 \quad (١٠ - ٤)$$

أو :

$$W_n = h_3 + h_5 - h_4 - h_6 - v_1 (P_2 - P_1) \quad (١١ - ٤)$$

الكفاءة الحرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} = \frac{h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \quad (١٢ - ٤)$$

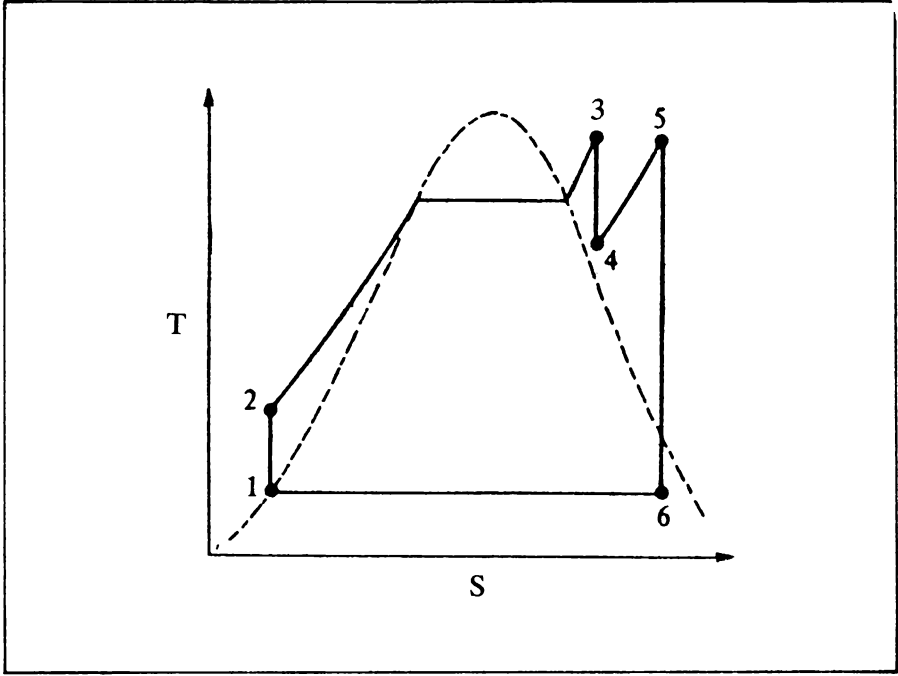


الشكل (٤ - ٦)
دورة إعادة التسخين (Reheat Rankine Cycle)

أو :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \quad (٤ - ١٣)$$

في دورات رانكن الحقيقية هناك ضياعات أو فواقد لا إرجاعية تحدث في كل من إجراء الانضغاط في المضخة وإجراء التمدد في التوربين تؤدي إلى تحويل جزء من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية وبالتالي زيادة قيم الانتالبي عند مخرجي المضخة والتوربين كما هو مبين في الشكل (٤ - ٨) على مخطط



الشكل (٤ - ٧)
دورة إعادة التسخين على مخطط (T-S)

(T - S) . وكما نلاحظ من الشكل فإن الإجراءات الحقيقية (غير المثالية)
يصاحبها زيادة في قيم الإنتروبيا (S) .

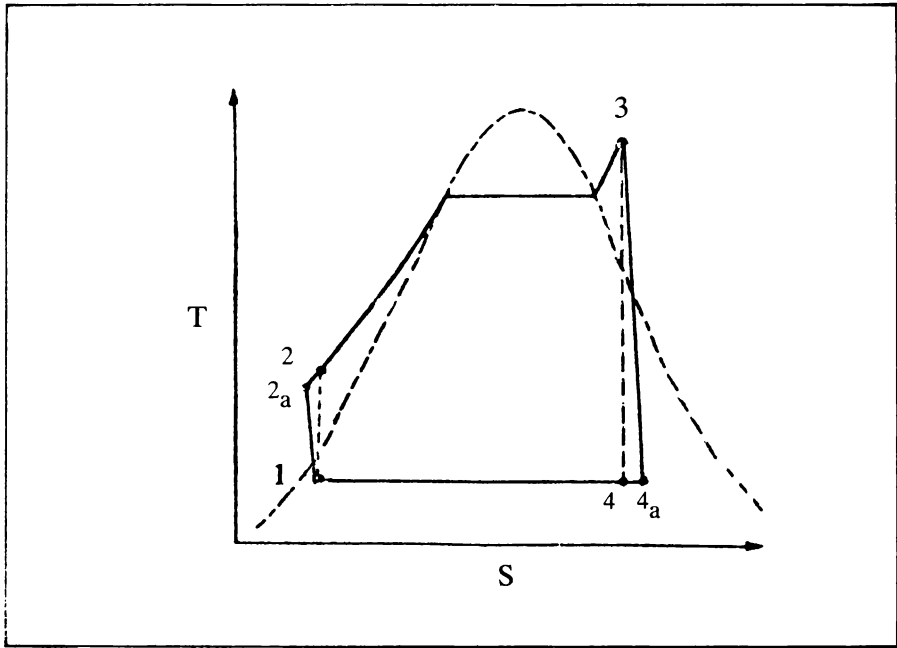
الشغل الحقيقي للتوربين :

$$W_{ta} = h_3 - h_{4a} \quad (٤ - ١٤)$$

$$= \eta_t (h_3 - h_4)$$

الشغل الحقيقي اللازم لتشغيل المضخة :

$$W_{pa} = h_{2a} - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_p} \quad (٤ - ١٥)$$



الشكل (٤ - ٨)
دورة رانكن البسيطة الحقيقية
على مخطط T-S (1 2_a 3 4_a)

أو :

$$W_{pa} \approx \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_p} \quad (٤ - ١٦)$$

حيث :

η_t : كفاءة التوربين .

η_p : كفاءة المضخة .

يمكن زيادة كفاءة دورة رانكن البسيطة وذلك بزيادة درجة الحرارة القصوى (T_3) للبخار وزيادة الضغط الأقصى (ضغط المرجل P_3) وتخفيض الضغط الأدنى (ضغط المكثف P_4) في الدورة. كما أن زيادة درجة حرارة التحميص

(Super heat) للبخار تؤدي إلى زيادة الشغل النوعي المنتج (Specific work)
(out put) وتقليل المحتوى الرطوبي للبخار في عادم التوربين .

في الواقع العملي فإن درجة الحرارة القصوى للدورة تكون محدودة بدرجة
تحمل المواد المعدنية التي يصنع منها كل من المحمص (Super heater)
ومدخل توربين الضغط المرتفع .

وتستخدم التوربينات البخارية الحديثة درجات حرارة قصوى تتراوح ما بين
٥٣٨ — ٥٩٥°س .

٤ - ١ - ٢ المحركات العاملة على الغاز :

يكون الوسيط العامل في هذه المحركات عبارة عن غاز ، وسنتعرف هنا إلى
ثلاث محركات عاملة على الغاز :

١ — محرك ستيرلنغ .

٢ — التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة .

٣ — التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة .

١ — محرك ستيرلنغ : (Stirling engine)

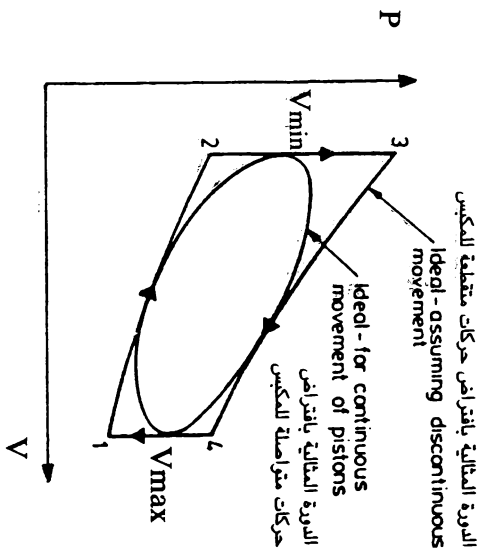
يعتبر محرك ستيرلنغ محركاً حرارياً له حسنات وسيئات أي محرك حراري
آخر ويمكن تشغيله باستخدام مصادر حرارة مختلفة كالهلب المباشر الناتج عن
حرق البترول أو الغاز أو الخشب أو الفحم الحجري وبالإمكان تشغيله أيضاً
بالطاقة الشمسية أو النووية .

الشكل (٤ - ١) و (٤ - ٩ ب) يبين دورة ستيرلنغ المثالية على مخططي
(P - V) و (T - S) . وإجراءات هذه الدورة هي :

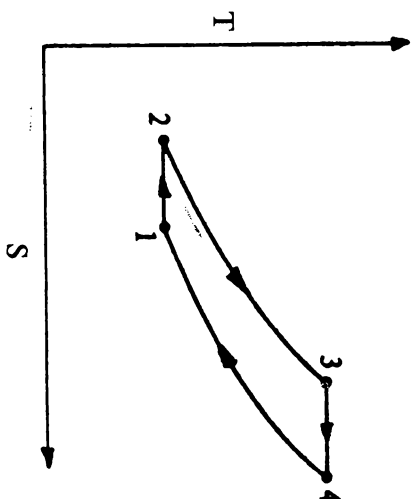
(٢ → ٣) تسخين الغاز (الوسيط العامل) عند حجم ثابت V_{min} إلى
درجة حرارة مرتفعة مقدارها T_3 وضغط مرتفع مقداره P_3 .

(٣ → ٤) تمدد الغاز عند درجة حرارة ثابتة (T_3) إلى الحجم الأقصى
 V_{max} ، وينتج خلال هذا التمدد شغل خارجي .

(٤ → ١) تبريد الغاز عند حجم ثابت إلى درجة حرارة منخفضة
مقدارها T_1 .



(ب)



(١)

الشكل (٤ - ٩)
دورة ستيرلينغ المثالية
على مخططي (P-V) و (T-S)

(2 → 1) انضغاط الغاز عند درجة حرارة ثابتة إلى الحجم الأدنى V_{min} .

إن هذه الإجراءات يمكن أن تتم باستخدام ترتيب مكون من مكبس وأسطوانة وملف تسخين مثلاً ، وفي هذه الحالة فإن المكبس ينجز شغلاً خارجياً عند تمدد الغاز نتيجة لاكتسابه الحرارة من ملف التسخين .

الشكل (٤ - ٩) يبين أيضاً دورة ستيرلنغ المثالية (المنحنى البيضوي الشكل) في حالة الحركة المستمرة للمكبس ، ويكون الشغل المنجز مساوٍ للمساحة المحصورة داخل المنحنى البيضوي .

يعطي الشغل المنجز في دورة ستيرلنغ المثالية بالمعادلة :

$$W_n = q_h - q_c \quad (٤ - ١٧)$$

والكفاءة :

$$\eta_s = \frac{W_n}{q_h} = \frac{q_h - q_c}{q_h} = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (٤ - ١٨)$$

حيث :

q_h : الحرارة المضافة للدورة من المصدر الخارجي الساخن .

q_c : الحرارة المفقودة من الدورة للمصدر الخارجي البارد .

وكما نلاحظ فإن الكفاءة النظرية لهذه الدورة هي نفس كفاءة دورة كارنوت .
تقاس الطاقة المتولدة / دورة بمقدار المساحة داخل المنحنى على مخطط (P - V) ، وفي محركات ستيرلنغ المستخدمة في الحياة العملية فإن مقدار هذه الطاقة / دورة يمكن زيادتها بشكل كبير وذلك برفع قيمة الضغط المتوسط (Mean pressure) العامل في الدورة ، وآلات ستيرلنغ الحديثة تستخدم ضغوطاً متوسطة مرتفعة ، وقد يصل الضغط المتوسط العامل إلى ١٠٠ بار أو أكثر .

ويمكن أيضاً تحسين كفاءة محرك ستيرلنغ باستخدام وسيط عامل له موصلية حرارية عالية مثل الهيدروجين والهيليوم بدلاً من الهواء، ولكن المشكلة في

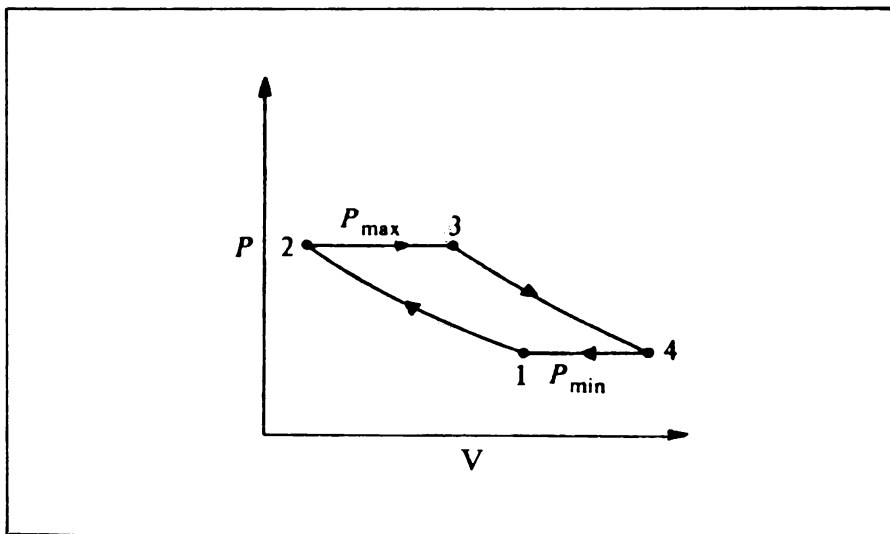
استخدام هذه الغازات أنها ذات تكاليف مرتفعة، ذلك لأن استخدامها يتطلب توافر نظام محكم الإغلاق لمنع تسرب الغاز من أجزاء المحرك المختلفة، في حين أن هذه المشكلة ليست ذات أهمية في حالة استخدام الهواء حيث أنه بالإمكان تعويض كمية الهواء المتسربة باستخدام ضاغط بسيط .

مما يجدر ذكره أن هناك دورة تسمى دورة أريكسون لها كفاءة مساوية لكفاءة دورة كارنوت. وتختلف هذه الدورة عن دورة ستيرلنج بأن الإجراءين (1 → 4) و (3 → 2) يتمان عند ثبات الضغط بدلاً من ثبات الحجم كما هو مبين في الشكل (٤ - ١٠) .

ولكن استخدام محرك حراري يعمل على دورة أريكسون يعد عملية غير مجدية من الناحية العملية، وذلك لأنه من الصعب اكتساب وفقد الحرارة عند ثبات الضغط خلال مرور الغازات العاملة في التوربين والضاغط .

خصائص محرك ستيرلنج:

تصمم محركات ستيرلنج بقدرات مختلفة ، فقد تكون هذه القدرات صغيرة



الشكل (٤ - ١٠)
دورة أريكسون المثالية على مخطط (P-V)

جداً (Few watts) ، وقد تصل إلى قيم مرتفعة تتراوح ما بين ٤٠٠ — ٥٠٠ حصان (400 - 500 hp) في بعض التطبيقات .

يمتاز محرك ستيرلنغ الذي يستخدم الهيليوم كوسيط عامل بأدائه العالي وضغطه المرتفع ودرجة حرارته العاملة المرتفعة التي تصل إلى ٧٠٠°س ، وتكون نسب القدرة / الوزن والقدرة / الحجم والفعالية لهذا المحرك مشابهة لمحرك ديزل ينتج نفس القدرة .

وتشمل الصفات العامة لمحرك ستيرلنغ ما يلي :

١ — يعتبر وحدة محكمة الإغلاق مما يسهل عملية التزيت ويقلل متطلبات الصيانة ويعطي عمراً أطول للمحرك . وهناك عامل آخر يساهم في إطالة عمر المحرك وهو خلوه من الصمامات .

٢ — إمكانية تشغيله باستخدام أنواع مختلفة من الوقود .

٣ — انخفاض نسبة الغازات العادمة الملوثة للجو التي يولدها المحرك وذلك بسبب استمرارية الاحتراق، بعكس محرك الاحتراق الداخلي الذي تكون عملية الاحتراق فيه متقطعة.

٤ — عدم تغير العزم كثيراً مع تغير السرعة حيث يحافظ العزم على قيم مرتفعة نسبياً عند السرعات العالية مما يشجع على استخدام المحرك كبديل لمحرك الاحتراق الداخلي في بعض التطبيقات التي تتطلب عزوماً مرتفعة كآلات الجر .

٥ — انخفاض مستوى الضجة والاهتزازات في محركات ستيرلنغ وذلك لغياب الانفجار الناتج عن الاحتراق المفاجيء (في شوط القدرة) في الأسطوانة كما يحدث في محرك الاحتراق الداخلي وانخفاض الضجة في العادم بالإضافة إلى أن عدم وجود الصمامات يساهم أيضاً في تقليل الضجة .

التطبيقات العملية لمحركات ستيرلنغ :

على الرغم من أن فكرة المحرك قديمة إلا أنه أصبح يحظى بالاهتمام الزائد حديثاً ، ويستخدم هذا المحرك في التبريد ولكن بشكل غير تجاري ، ولعل أداءه الذي يضاهي أداء محرك الديزل مع امتيازه عنه بهدوئه النسبي وانخفاض مستويات التلوث يكسبه المزيد من الأهمية في الكثير من التطبيقات العملية. وهناك اتجاه حديث لإنتاج محركات ستيرلنج بقدرات تصل إلى ١٠٠٠ حصان بسرعات بطيئة لاستخدامها في النقل البري والبحري الثقيل ، وهناك إمكانية واسعة لاستخدام محركات ستيرلنج بقدرات تصل إلى ١٥ كيلوواط لتوليد الكهرباء في الدول النامية وذلك باستغلال الفحم الحجري أو أخشاب الأشجار كوقود لهذه المحركات .

٢ - التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة :

يعمل التوربين الغازي على دورة ذات نظام احتراق خارجي. ومبدأ عمل التوربين الغازي يشبه إلى حد كبير مبدأ عمل التوربين البخاري المشروح سابقاً مع وجود فرق واحد وهو أنه في حالة التوربين الغازي فإن الغاز الذي يتم تبريده بعد تمدده في التوربين يبقى في حالته الغازية ولإعادته إلى المُسخن وهو في حالته الغازية فإن ذلك يتطلب شغلاً كبيراً جداً (أكبر بكثير من الشغل المطلوب من مضخة الماء في التوربين البخاري) للضاغط .

يعمل التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة على دورة برايتون. والإجراءات المثالية لهذه الدورة مبينة في الشكل (٤ - ١١ أ) و (٤ - ١١ ب) على مخططي (P - V) و (T - S) وهي :

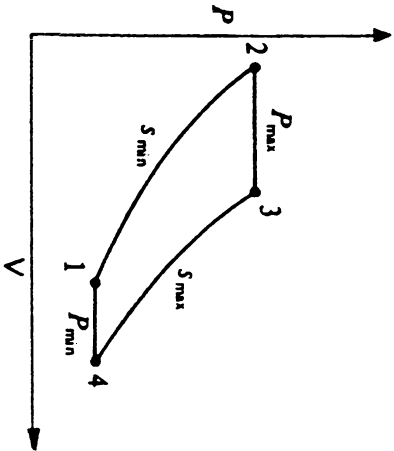
(1 → 2) انضغاط أيزونتروبي في الضاغط .

(2 → 3) اكتساب الحرارة إرجاعياً (إنعكاسياً) عند ثبات الضغط .

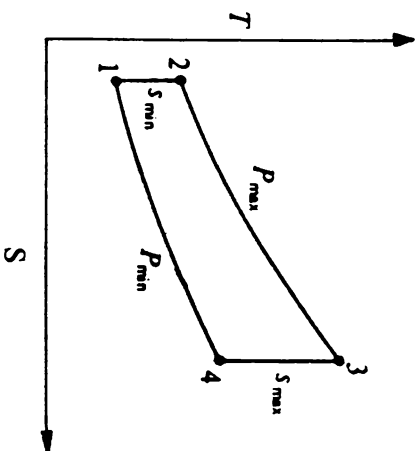
(3 → 4) تمدد الوسيط العامل أيزونتروبياً ($\Delta S = 0$) .

(4 → 1) فقد الحرارة إرجاعياً عند ثبات الضغط .

الشكل (٤ - ١٢) يبين المكونات الرئيسة للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة وهي على الترتيب : الضاغط (١) المسخن (مبادل حراري) (٢) والتوربين (٣) والمبرد (مبادل حراري) (٤) .

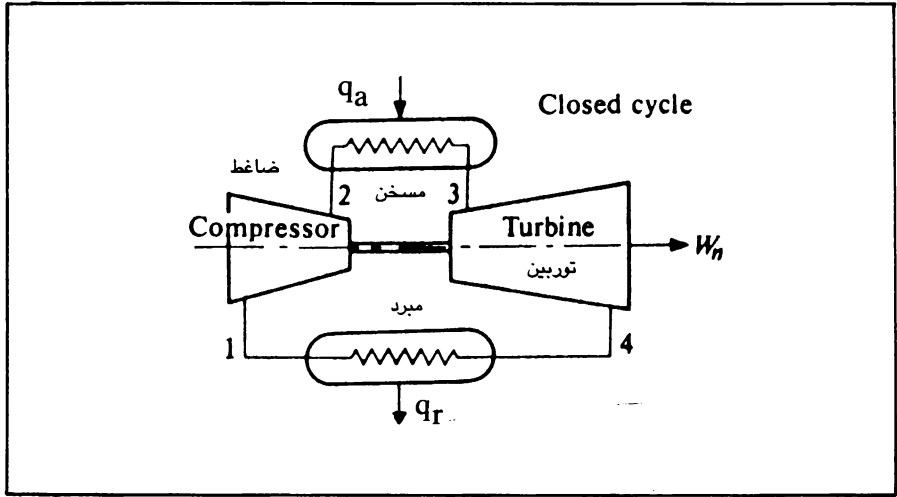


(ب)



(١)

الشكل (١١ - ٤)
دورة برانتون المثالية على مخططي (P-V) و (T-S)



الشكل (١٢ - ٤)
المكونات الأساسية للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة

إن اكتساب الحرارة في الإجراء (2 → 3) يؤدي إلى زيادة في حجم الغاز مما يؤدي بدوره إلى زيادة في الشغل المنجز خلال تمدد الغاز في التوربين وهذه الزيادة هي التي تعطي الشغل الصافي المنجز للدورة .

من دورة برايتون المثالية نجد أن :

الحرارة المكتسبة في الدورة :

$$q_a = \dot{m} C_p (T_3 - T_2) \quad (١٩ - ٤)$$

الحرارة المفقودة من الدورة :

$$q_r = \dot{m} C_p (T_4 - T_1) \quad (٢٠ - ٤)$$

حيث :

\dot{m} : معدل تدفق الكتلة للغاز (kg / s) .

C_p : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط (kJ / kg. k) .

وبتطبيق القانون الأول في التيرموديناميك فإن الشغل الصافي المنجز :

$$W_n = q_a - q_r \quad (٢١ - \varepsilon)$$

الكفاءة الحرارية للدورة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{\dot{m} C_p (T_4 - T_1)}{\dot{m} C_p (T_3 - T_2)} \quad (٢٢ - \varepsilon)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (٢٣ - \varepsilon)$$

$$= 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

بما أن إجراءي الانضغاط والتمدد أيزونتروبيين :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (٢٤ - \varepsilon)$$

و

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (٢٥ - \varepsilon)$$

إذاً :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (٢٦ - \varepsilon)$$

من المعادلتين (٢٣ - \varepsilon) و (٢٦ - \varepsilon) نجد أن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (٢٧ - \varepsilon)$$

أو :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{8-1}{8}}} \quad (٢٨ - \varepsilon)$$

$$= 1 - (r_p)^{\frac{1-8}{8}}$$

حيث :

$r_p = P_2 / P_1$: نسبة الانضغاط في الضاغط .

٨ : الأس الأيزونتروبي للغاز (الوسيط العامل) وللهواء فإن
($8 = 1.4$) .

بما أن :

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{8-1}{8}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{8-1} \quad (٢٩ - \varepsilon)$$

فإنه يمكن كتابة المعادلة ($٢٨ - \varepsilon$) على النحو :

$$\eta_{th} = 1 - (r_v)^{1-8} \quad (٣٠ - \varepsilon)$$

حيث :

$r_v = v_1 / v_2$ نسبة الحجم في الضاغط .

من الغازات الشائع استخدامها في التوربينات الغازية ذات الدورات المغلقة، الغازات الخاملة كالهيليوم والنيون والآرغون حيث ان هذه الغازات ذات قيم عالية للأس الأيزونتروبي (٨) مقارنة مع الأس الأيزونتروبي للهواء مما يساهم في رفع كفاءة الدورة . وتزداد كفاءة الدورة أيضاً بزيادة درجة حرارة الغاز الداخل للتوربين (T_3) ، وقد أصبح بالإمكان تشغيل التوربينات الغازية بدرجات حرارة دخول (T_3) تصل إلى ١٥٠٠°س ويعود ذلك إلى التطورات الكبيرة التي طرأت على المواد التي تصنع منها ريش التوربين والتي تضم سبائك مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة .

٣ - التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة :

في التوربين الغازي ذي الدورة المفتوحة فإن الوسيط العامل هو الهواء الجوي في الضاغط الذي يتحول إلى غازات محترقة (ثاني أكسيد الكربون + بخار الماء + هواء) في الحارقة قبل دخوله للتوربين. ويتم فقد الحرارة (q_r) إلى الجو مباشرة وليس هناك حاجة لوجود مبادل حراري (مُبرد) كما هو الحال في التوربين ذي الدورة المغلقة . وهكذا ، فإن الغاز العادم (نواتج الاحتراق) يطرد من التوربين بعد عملية التمدد إلى الجو ، أي أن الوسيط العامل يتجدد (يتغير) باستمرار ولا يعاد للعمل مرة أخرى كما هو الحال في الدورة المغلقة .

ويستعمل هذا التوربين في الطائرات النفاثة ، حيث أن جزءاً من عملية التمدد يتم في الفوهة (Nozzle) ، التي تلي التوربين مباشرة ، وكذلك يستعمل توربين الدورة المفتوحة في محطات توليد الكهرباء خصوصاً في حالات الحمل الأقصى (Peak - Load) وذلك بسبب السرعة العالية التي يمكن بواسطتها الوصول لإنتاج الحمل الأقصى بواسطة هذا التوربين .

ولعل أهم ميزة لتوربين الدورة المفتوحة على توربين الدورة المغلقة تتمثل في انتقال الحرارة . حيث أنه ليس هناك حاجة لوجود مبرد كما هي مبين في الشكل (٤ - ١٣) .

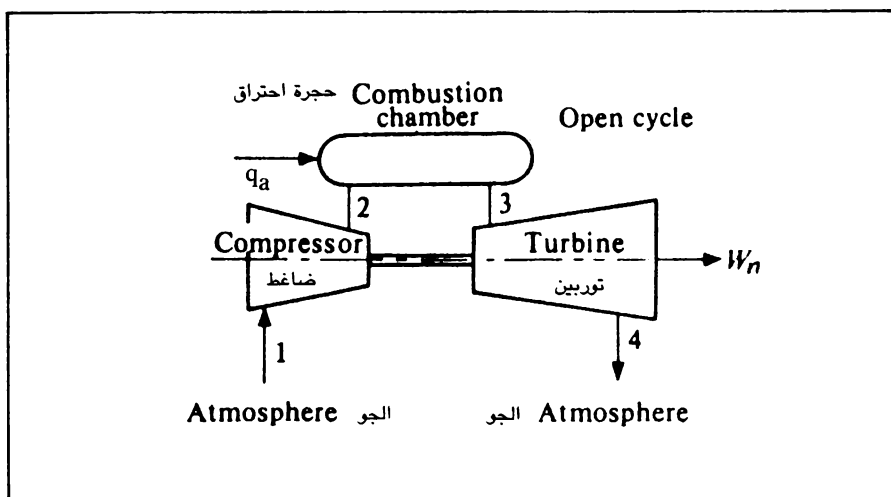
الإجراءات المثالية لدورة التوربين الغازي ذي الدورة المفتوحة مبينة في الشكل (٤ - ١٤) على مخطط (T-S) .

مثال :

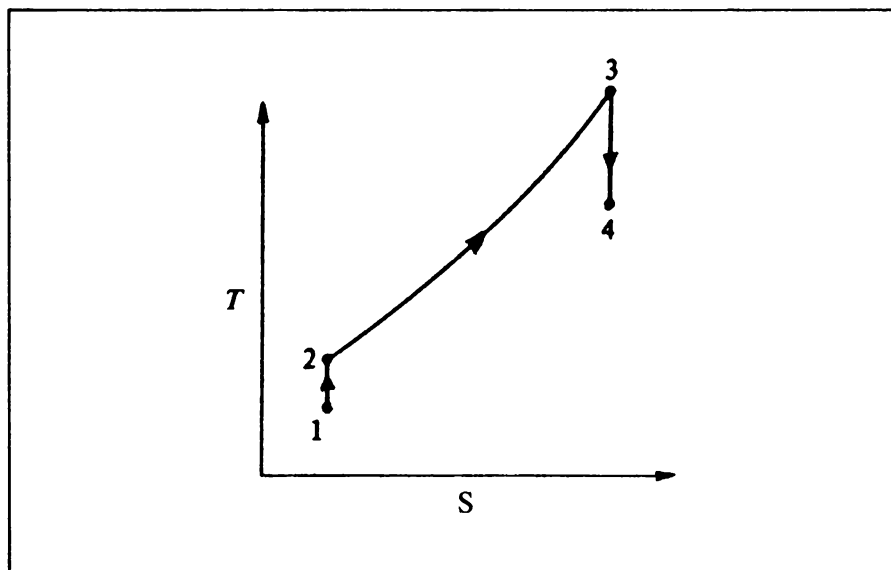
في دورة برايتون مثالية لتوربين غازي ذي دورة مغلقة كان الضغط ودرجة الحرارة في بداية عملية الانضغاط ($P_1 = 0.965 \text{ bar}$) و ($T_1 = 15^\circ \text{C}$) وكانت نسبة الانضغاط ($r_p = 6$) وكانت أقصى درجة حرارة للدورة ($T_3 = 961 \text{ K}$) .

احسب :

- ١ - كفاءة الدورة .
- ٢ - الحرارة المكتسبة في الدورة .
- ٣ - الشغل الصافي المنجز في الدورة .



الشكل (١٣ - ٤)
التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة



الشكل (١٤ - ٤)
الدورة المثالية للتوربين الغازي
ذي الدورة المفتوحة على مخطط (T-S)

افترض أن ($\gamma = 1.40$) ، وأن ($C_p = 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$) للهواء .

$$1 - \eta_{th} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 1 - (6)^{\frac{1-1.4}{1.4}} = 0.4 = 40 \%$$

$$\begin{aligned} 2 - \frac{T_2}{T_1} &= (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_2 = T_1 (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \\ &= (15 + 273) (6)^{\frac{0.4}{1.4}} = 480.5 \text{ K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{q_a}{\dot{m}} &= C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (961 - 480.5) \\ &= 241.5 \text{ KJ / kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3 - \frac{W_n}{\dot{m}} &= q_a \times \eta_{th} \\ &= 241.5 \times 0.4 = 96.6 \text{ KJ / kg.} \end{aligned}$$

مثال :

محطة توربينية غازية تولّد قدرة مقدارها ٢٠ ميغاواط (20 MW) في ظروف التشغيل الآتية :

درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط = ٢٠°س وضغطه = ٤,٢ بار .

درجة حرارة الغاز الداخل للتوربين = ٨٥٠°س .

بافتراض أن الأس الأيزونتروبي للهواء ($\gamma = 1.4$) .

وأن الحرارة النوعية عند ثبات الضغط للهواء ($C_p = 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$) .

أوجد :

١ - درجات الحرارة عند كل نقطة من نقاط الدورة .

- ٢ — الشغل المنجز لكل كغم من الغاز العامل (الشغل النوعي) .
 ٣ — الشغل النوعي لكل من الضاغط والتوربين .
 ٤ — الكفاءة الحرارية .
 ٥ — معدل تدفق الكتلة للغاز العامل في الدورة .

$$T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad \text{— ١}$$

$$T_3 = 850 + 273 = 1123 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293 \left(\frac{4.2}{0.98} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 444.1 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1123 \times \frac{293}{444.1} = 740.9 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \frac{q_a}{\dot{m}} &= C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (1123 - 444.1) \quad \text{— ٢} \\ &= 682.3 \text{ KJ / kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{q_r}{\dot{m}} &= C_p (T_4 - T_1) = 1.005 (740.9 - 293) \\ &= 450.14 \text{ KJ / kg} \end{aligned}$$

$$\frac{W_n}{\dot{m}} = \frac{q_a}{\dot{m}} - \frac{q_r}{\dot{m}} = 232.16 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_c}{\dot{m}} &= C_p (T_2 - T_1) = 1.005 (444.1 - 293) \quad \text{— ٣} \\ &= 151.86 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_4) = 1.005 (1123 - 740.9) = 384.01 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} \quad \text{— ٤}$$

$$= \frac{232.16}{682.3} = 0.34$$

أيضاً :

$$\frac{W_n}{\dot{m}} = \frac{W_t}{\dot{m}} - \frac{W_c}{\dot{m}} = 384.01 - 151.86 = 232.15 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = \frac{\text{Power}}{(W_n / \dot{m})} = \frac{20 \times 10^6 \text{ watt}}{232.16 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \quad \text{— ٥}$$

$$\dot{m} = 86.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

٤ - ٢

تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية

٤ - ٢ - ١ محرك الاحتراق الداخلي :

يتم تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتراق (احتراق داخل غرفة مغلقة كاسطوانة السيارة) حيث تتحول هذه الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة ميكانيكية في هذه المحركات . تقسم محركات الاحتراق الداخلي من حيث كيفية الإشعال للوقود إلى :

١ - محركات الإشعال بواسطة الشمعات (Spark ignition) ، وتشمل محركات البنزين عموماً .

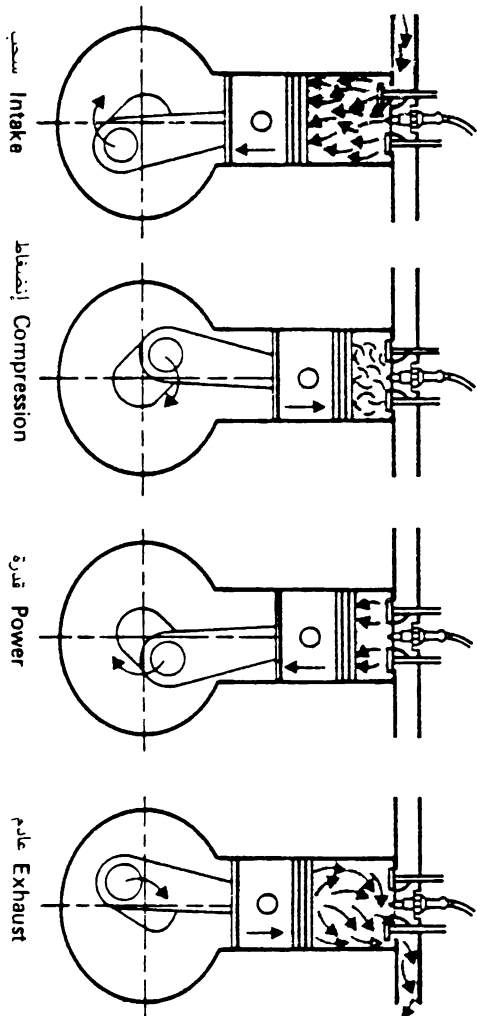
٢ - محركات الإشعال بواسطة الانضغاط (Compression ignition) ، وتشمل محركات الديزل .

ومعظم محركات الاحتراق الداخلي محركات ترددية ذات مكبس واسطوانة ، ومن ناحية عدد الأشواط وترتيب عملية الإشعال فإن محركات الاحتراق الداخلي تقسم إلى محركات رباعية الأشواط ومحركات ثنائية الأشواط .

كما هو مبين في الشكل (٤ - ١٥) فإن المحركات رباعية الأشواط يلزمها أربعة أشواط للمكبس لإكمال دورة الاحتراق (إجراءات الدورة الأربعة) وهذه الإجراءات هي :

١ - شوط السحب : يكون صمام السحب مفتوحاً وصمام الطرد مغلقاً .

٢ - شوط الانضغاط : تكون صمامات السحب والطرد مغلقة .



الشكل (١٥ - ٤)
 الأشواط الأربعة لمحرك الاحتراق الداخلي رباعي الأشواط

٣ — شوط القدرة : تكون صمامات السحب والطرء مغلقة أيضاً ويشتعل فيه مزيج الهواء والوقود .

٤ — شوط الطرد : يكون صمام السحب مغلقاً وصمام الطرد مفتوحاً .

في المحرك رباعي الأشواط — كما نلاحظ — فإن عمود المرفق يدور دورتين كاملتين (لفتين) لكل دورة احتراق (أربعة أشواط) . الدورة الثيرموديناميكية النظرية لمحرك الاحتراق الداخلي بالإشعال بواسطة الشمعات هي دورة أوتو المبينة في الشكل (٤ - ١٦) على مخططي (P-V) و (T-S) .

تختلف الدورة الحقيقية لمحرك الاحتراق الداخلي عن الدورة النظرية باختفاء القرن كما هو مبين في الشكل (٤ - ١٧) . ويعود ذلك إلى حركة المكبس المستمرة داخل الاسطوانة ويكون الشغل الحقيقي المنجز خلال دورة احتراق كاملة مساوياً للمساحة المحصورة داخل خريطة المبين (Indicator diagram) الموضحة على مخطط (P-V) في الشكل (٤ - ١٧) ، وتكون المساحة المحصورة داخل خريطة المبين أقل من المساحة المحصورة داخل الدورة المثالية على مخطط (P-V) — الشكل (٤ - ١٦/أ) — بسبب فواقد الاحتكاك والفواقد الحرارية وغيرها .

تعطى الكفاءة الحرارية لدورة أوتو المثالية بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)} \quad (٤ - ٣١)$$

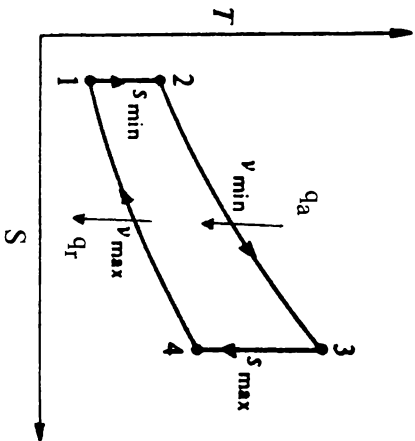
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \quad (٤ - ٣٢)$$

حيث :

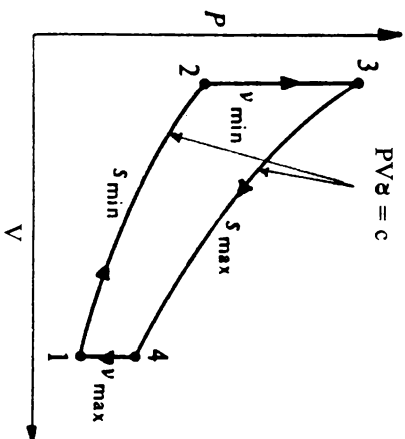
C_v : الحرارة النوعية للهواء عند ثبات الحجم .

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} : \text{الأس الايزونتروبي للهواء .}$$

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} : \text{نسبة الحجوم أو نسبة الانضغاط (Compression ratio) .}$$

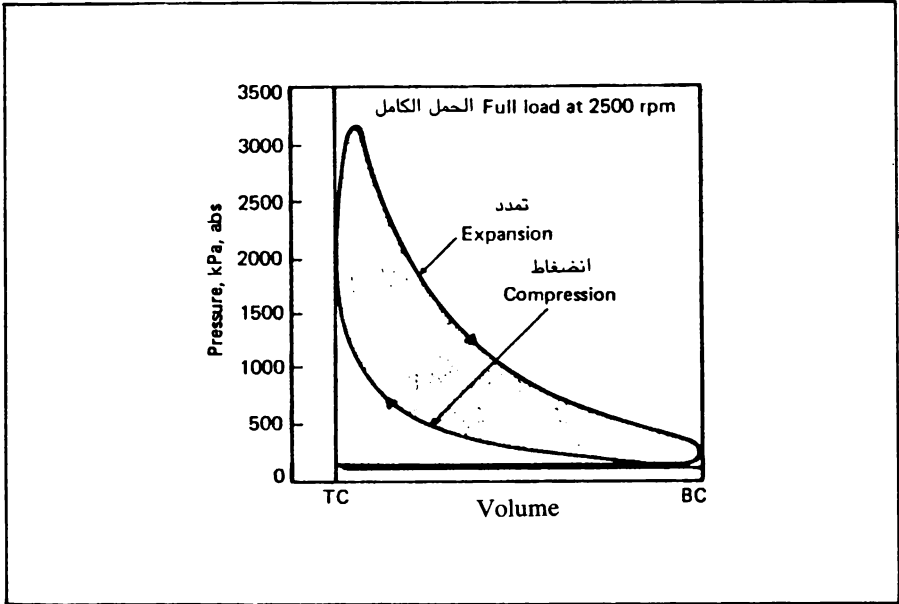


(ب)



(١)

الشكل (٤ - ١٦)
دورة أوتو المثالية على مخططي (P-V) و (T-S)



الشكل (٤ - ١٧)
خريطة المبين لأحد محركات الاحتراق الداخلي
رباعي الأشواط عند الحمل الكامل

ويطلق على حجم الاسطوانة عندما يكون المكبس في النقطة الميتة العليا (T D C) اسم حجم الخلوص (Clearance Volume) فتكون نسبة الانضغاط عبارة عن الحجم الكلي للأسطوانة مقسوماً على حجم الخلوص .

وبفحص المعادلة (٤ - ٣٢) نجد أن الكفاءة الحرارية لدورة أوتو يمكن زيادتها بزيادة نسبة الانضغاط أو بزيادة قيمة الأس الايزونتروبي (٨) للوسيط العامل أو كلاهما. ولكن بما أن المقصود هو محرك الاحتراق الداخلي فإن الوسيط العامل يجب أن يكون مزيجاً من الهواء والوقود، لذا فإن قيمة الأس الايزونتروبي (٨) تبقى ثابتة تقريباً . أما نسبة الانضغاط فإنه ليس بالإمكان زيادتها من دون حدود وذلك لتجنب حدوث ظاهرة الصفع (Detonation) والتي تؤدي إلى تقصير عمر المحرك .

يوضح الشكل (٤ - ١٨) طريقة عمل محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الأشواط .

عندما يتحرك المكبس للأسفل في شوط القدرة يكشف فتحة الخروج (Exhaust port) لتخرج الغازات المحترقة (المضغوطة) وفي نفس الوقت يضغط مزيج الهواء والوقود داخل غطاء المرفق، وباستمرار نزوله للأسفل يكشف فتحة دخول المزيج بين غطاء المرفق والاسطوانة (Transfer port) مما يؤدي إلى دخول شحنة الهواء والوقود المضغوطة للأسطوانة .

وفي شوط الانضغاط أثناء حركة المكبس للأعلى فإنه يغلق فتحة الدخول ثم فتحة الخروج ويضغط شحنة الهواء والوقود في الاسطوانة، ثم تقوم شمعة الإشعال بإعطاء الشرارة اللازمة لبدء عملية الاحتراق قبل وصول المكبس للنقطة الميتة العليا (T D C) بقليل مما يؤدي إلى نزول المكبس للأسفل في شوط القدرة وتكرر العمليات السابقة .

في هذا المحرك يضاف الزيت اللازم لتزييت عمود المرفق وكراسي التحميل إلى الوقود. وكما نلاحظ فإن الاشتعال لكل اسطوانة يحصل مرة واحدة لكل دورة لعمود المرفق .

لمحركات الاحتراق الداخلي رباعية الأشواط بعض الميزات على ثنائية الأشواط :

١ — اقتصادية أكثر في استهلاك الوقود .

٢ — التزييت فيها أفضل .

٣ — التبريد فيها أسهل .

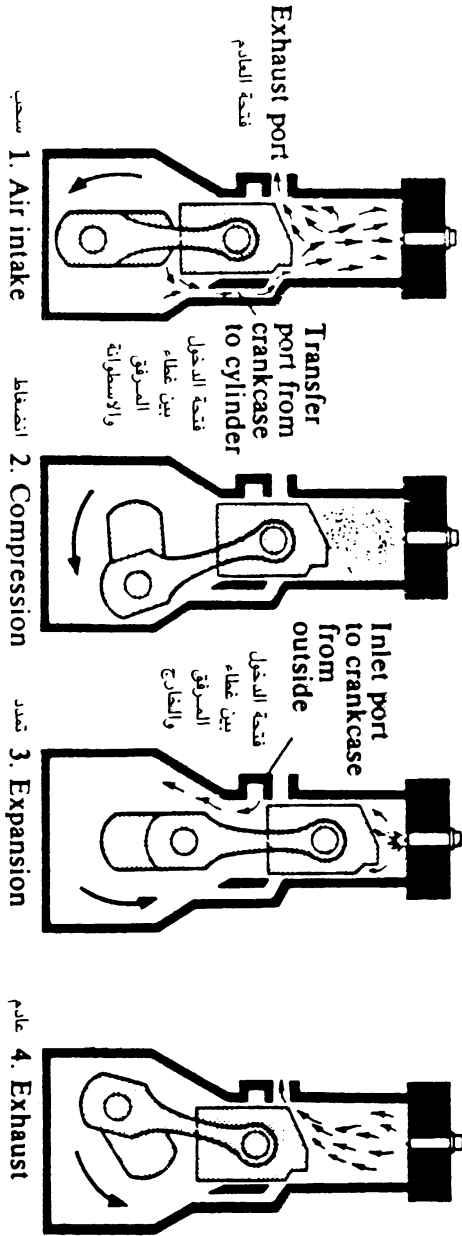
أما ميزات المحرك ثنائي الأشواط فهي :

١ — عدد الأجزاء المتحركة أقل.

٢ — وزن أخف .

٣ — تشغيل أنعم (Smoother operation) .

هناك محركات ثنائية الأشواط ذات صمامات وأنظمة تزييت مستقلة .



الشكل (١٨ - ٤)
 اثواط محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الاثواط

الشكل (٤ - ١٩) يبين أوضاعاً متعددة لاسطوانات محركات الاحتراق الداخلي .

في حالة المحركات ذات الأربعة والستة اسطوانات فإنه من المألوف استعمالها في المحركات المستقيمة (محركات السيارات) .

ويستعمل الترتيب على شكل حرف V في حالة المحركات ذات الثماني اسطوانات التي تبرد بواسطة الهواء، ويستعمل وضع المكابس المتعكسة عادة في محركات الديزل الكبيرة . أما الترتيب على شكل دلتا (∇) فإنه يستعمل في الصناعات البترولية .

وقد شاع استعمال الترتيب القطري أو المحرك القطري الذي يمتاز بارتفاع نسبة القدرة / الوزن في محركات الطائرات قبل اختراع المحركات النفاثة .

أما أشهر محركات الاحتراق الداخلي الدوارة فهو محرك فأنكل (Wankel engine) الذي يستخدم قرصاً مثلثي الشكل كعضو دوار ومن ثم تنقل هذه الحركة إلى العمود المقاد بواسطة ترس داخلي .

يعطي هذا المحرك سرعات عالية تتراوح ما بين ٣٠٠٠ - ٨٠٠٠ دورة / دقيقة وهو أخف وزناً وله عدد أقل من الأجزاء المتحركة وأسهل في تصنيعه مقارنة بمحرك الاحتراق الداخلي الترددي .

وأهم مشاكل هذا المحرك هي مشكلة الحواظف (Sealing problems) ، والتي تؤدي إلى عدم الاقتصاد في استهلاك الوقود مما يقلل الاهتمام به .

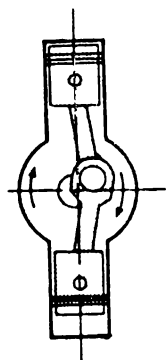
ويعمل هذا المحرك على نفس مبدأ عمل المحرك رباعي الأشواط، وأشواطه هي السحب والانضغاط والاشتعال والقدرة والطرء، كما هو مبين في الشكل (٤ - ٢٠) .

هناك أنواع أخرى مختلفة من محركات الاحتراق الداخلي ولكنه لم يظهر من هذه الأنواع ما هو أفضل من محرك الاحتراق الداخلي الترددي حتى الآن .

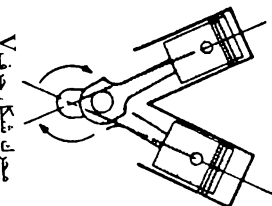
أداء محرك الاحتراق الداخلي :

هناك عدة معاملات أداء من الشائع استعمالها لدراسة أداء محركات الاحتراق الداخلي، وأحد هذه المعاملات الرئيسية هو القدرة الحصانية الفرملية (B H P) وتعرف بأنها القدرة المتولدة على العمود المقاد للآلة، وتقاس هذه

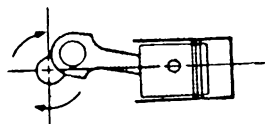
الشكل (١٩ - ٤)
الأوضاع المختلفة للأسطوانات
في محركات الاحتراق الداخلي



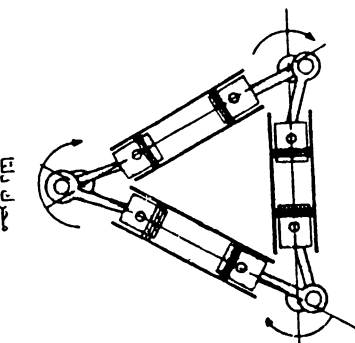
Horizontal engine
محرك مستقيم



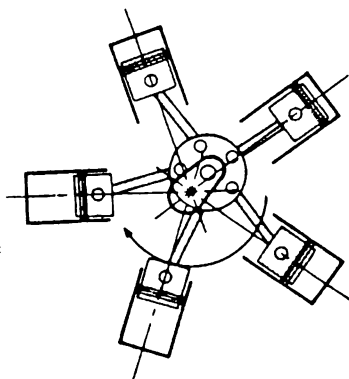
محرك شكل حرف V
Vee-type engine



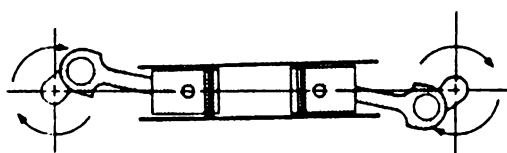
Vertical in-line



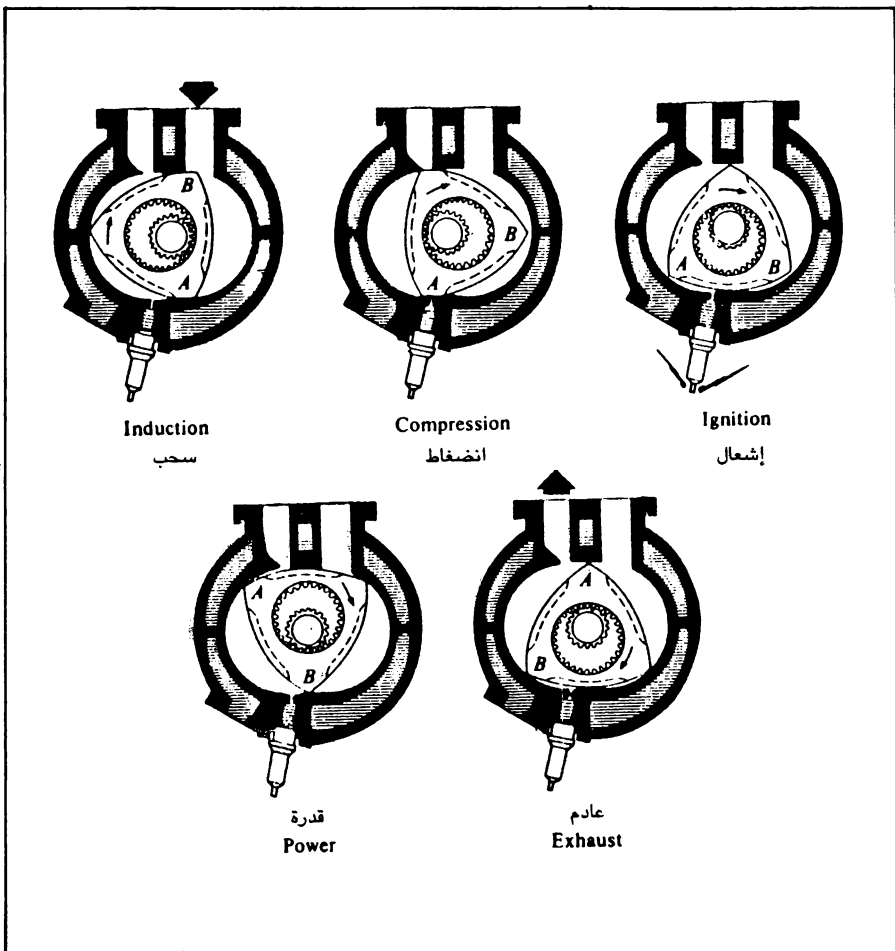
محرك دلتا
Delta engine



المحرك القطني
Radial engine



محرك المكابس
المضادة
Opposed
piston engine



الشكل (٤ - ٢٠)
أشواط محرك فانكل الدوار

القدرة بواسطة جهاز مقياس العزوم (Dynamometer) وذلك بتطبيق قوة مفرملة خلال ذراع عزم على العمود المقاد حتى يتم إيقافه فتكون القدرة الفرملية اللازمة بالحصان :

$$BHP = (F.R) \frac{w}{735} = \frac{F.R}{735} \left(\frac{2\pi N}{60} \right) = \frac{2\pi NFR}{44100} \quad (٤ - ٢٣)$$

حيث :

N : سرعة الآلة الدورانية (R P M)

F : القوة الفرملية (N)

R : ذراع العزم (m)

أما المعامل الثاني فهو القدرة الحصانية البيانية (I H P) وهي القدرة المعطاة للمكبس من الغازات أو السوائل العاملة في الآلة .

والفرق بين (B H P) و (I H P) هو القدرة الحصانكية الاحتكاكية (F H P)

$$I H P = B H P + F H P \quad (٤ - ٣٤)$$

والكفاءة الميكانيكية (η_m) لمحرك الاحتراق الداخلي

$$\eta_m = \frac{B H P}{I H P} \quad (٤ - ٣٥)$$

ومن المتغيرات الهامة في آلات الاحتراق الداخلي هو الضغط الفرملية المتوسط الفعال (B M E P) والضغط البياني المتوسط الفعال (I M E P)

ويعطى الضغط الفرملية المتوسط الفعال بالمعادلة :

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) N_p}{44100} \quad (٤ - ٣٦)$$

والضغط البياني المتوسط الفعال :

$$I H P = \frac{(I M E P) (V_S) N_p}{44100} \quad (٤ - ٣٧)$$

حيث :

$$V_S = \frac{\pi D^2 L}{4} (m^3) : إزاحة الكباس (الحجم المزاح)$$

D : قطر الكباس (m)

L : طول الشوط (m)

$$N_p = \frac{C N}{a} : \text{عدد أشواط القدرة لكل دقيقة}$$

C : عدد الاسطوانات

N : سرعة الآلة (R P M)

a : تساوي (١) للآلة ثنائية الأشواط وتساوي (٢) للآلة رباعية لأشواط .

وتقاس اقتصاديية الآلة بمعدل استهلاك الوقود النوعي الفرمللي (B sfc)
ويعطى بالمعادلة :

$$B sfc = \frac{\text{Fuel rate (kg / hr)}}{B H P} \quad (٣٨ - ٤)$$

أما الكفاءة الحرارية (الكلية) للمحرك فتعطى بالمعادلة :

$$\eta_{th} = \frac{4898}{(B sfc) (L H V)} \quad (٣٩ - ٤)$$

حيث :

L H V : القيمة الحرارية (المحتوى الحراري) الدنيا للوقود
(KJ / kg)

وتعرف الكفاءة الحجمية لمحرك الاحتراق الداخلي كالآتي :

$$\eta_v = \frac{\text{حجم الهواء الداخل للاسطوانة عند الظروف الجوية}}{\text{إزاحة المكبس}} \quad (٤٠ - ٤)$$

وتكون قيم الكفاءة الحجمية مرتفعة الاحتراق الداخلي وقد تزيد قيمة الكفاءة الحجمية عن ١٠٠ ٪ في حالة استخدام الشحانات (Super chargers) .

مثال :

في محرك ثنائي الأشواط (ذات اسطوانتين) كانت سرعة المحرك (600 R P M) وقطر المكبس (110 m m) وطول الشوط (140 m m) إذا كانت (I H P = 20) والكفاءة الميكانيكية تساوي (0.82) . احسب (I H P) و (B M E P) .

$$\eta_m = \frac{B H P}{I H P} \Rightarrow 0.82 = \frac{B H P}{20} \Rightarrow B H P = 16.4$$

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) (N_P)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{\pi \left(\frac{110}{1000}\right)^2 * 0.14}{4} = 0.00133 \text{ m}^3$$

$$N_P = \frac{C N}{a} = \frac{2 * 600}{1} = 1200 \frac{\text{Power Stroke}}{\text{minute}}$$

$$16.4 = \frac{(B M E P) (0.00133) (1200)}{44100}$$

$$\begin{aligned} B M E P &= 453158 \text{ Pascal} \\ &= 453 \text{ Kpa} \\ &= 4.53 \text{ bar} \end{aligned}$$

مثال :

محرك احتراق داخلي ذو ثماني اسطوانات ورباعي الأشواط سرعته (2400 R P M) وقطر كباسه (120 m m) وطول الشوط (125 m m) ، إذا كان (B M E P = 820 KPa) .

احسب (B H P) ، وإذا كانت الكفاءة الميكانيكية هي (0.85) احسب (I H P)

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) (N_p)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\eta D^2 L}{4} = \frac{\eta (0.12)^2 (0.125)}{4} = 0.00144 \text{ m}^3$$

$$N_p = \frac{C N}{a} = \frac{8 \times 2400}{2} = 9600 \frac{\text{Power stroke}}{\text{minute}}$$

$$B H P = \frac{820 * 10^3 * 0.0014 * 9600}{44100} = 252.4$$

$$I H P \frac{B H P}{\eta_m} = \frac{252.4}{0.85} = 296.94$$

مثال :

في دورة أوتو مثالية كانت درجة الحرارة في بداية إجراء الانضغاط ($T_1 = 50^\circ\text{C}$) والضغط ($P_1 = 0.97 \text{ bar}$) ونسبة الحجوم هي (5:1) .

إذا كانت الحرارة المكتسبة في الدورة تساوي (930 KJ / kg) احسب :

١ — درجة الحرارة العظمى .

٢ — الكفاءة الحرارية .

٣ — الشغل المنجز لكل كغم من الغاز العامل (الشغل النوعي) .

افترض أن ($C_v = 0.717 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$) وأن ($\gamma = 1.4$) للغاز العامل .

$$T_1 = T_2 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma} - 1 = (50 + 273) \left(\frac{5}{1} \right)^{1.4} - 1 = 615 \text{ K} \quad \text{— ١}$$

$$q_a = C_v (T_3 - T_2) = 0.717 (T_3 - 615)$$

$$920 = 0.717 (T_3 - 615)$$

$$T_3 = 1910 \text{ K} = 1637^\circ\text{C}$$

$$\eta_{th} = 1 - (r_v)^{1 - \gamma} = 1 - (5)^{1 - 1.4} = 0.475 \quad \text{— ٢}$$

$$W_n = q_a \times \eta_{th} = 930 \times 0.475 = 442 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad \text{— ٣}$$

— محركات الاشتعال بواسطة الانضغاط (C I) — محركات الديزل :

تعرف محركات الاحتراق الداخلي ذات الانضغاط — الاحتراق (C I) بمحركات الديزل، وتصمم هذه المحركات عادة بنسب انضغاط تتراوح ما بين ١٠:١٤ — ١٠:٢٢ ففي شوط الانضغاط يرتفع الضغط للهواء إلى مقدار يصل إلى (3500 Kpa) أو أكثر وتصل درجة الحرارة إلى (540°C) وقبل وصول المكبس إلى النقطة الميتة العليا يحقن الوقود في الاسطوانة (غرفة الاحتراق) ويحدث الاحتراق بسرعة نتيجة لوصول المزيج إلى ضغط ودرجة حرارة تسمحان بحدوث الاشتعال الذاتي للوقود (الديزل). وتتراوح ضغوط حقن الوقود ما بين ٧ — ٧٠ ميغاباسكال. وتصنف محركات (C I) حسب سرعتها إلى محركات ذات سرعات منخفضة (أقل من 500 R P M) وذات سرعات متوسطة (500-1000 R P M) وذات سرعات عالية (أكثر من 1000 R P M) .

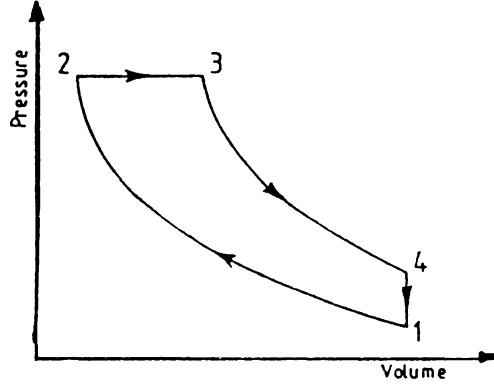
الدورة النظرية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط ، هي دورة ديزل المبينة في الشكل (٤ — ٢١) على مخطط (P-V) ، ويبين الشكل (٤ — ٢٢) الدورة الحقيقية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط على مخطط (P-V) .

وتعطى الكفاءة الحرارية لدورة ديزل المثالية (النظرية) بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \quad (٤ — ٤١)$$

ومنها فإن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (٤ — ٤٢)$$



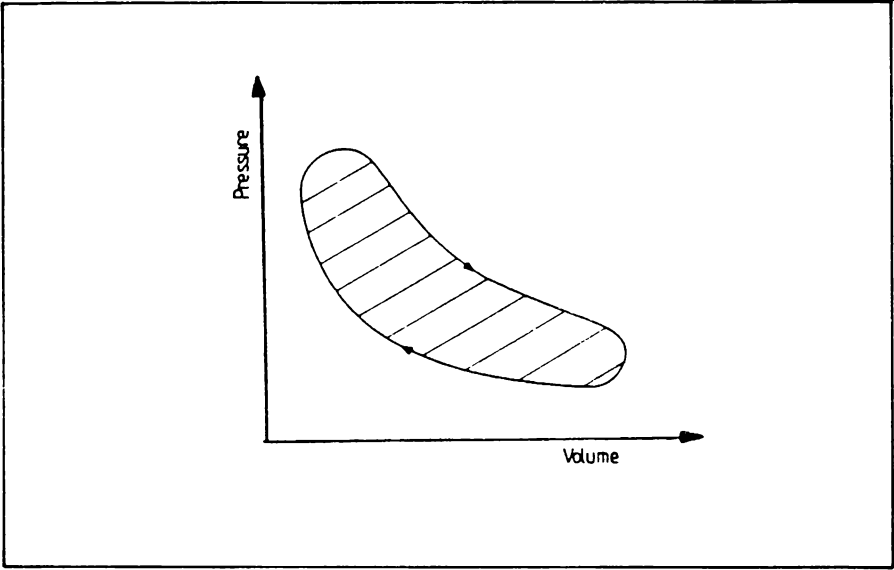
- | | |
|-----|-----------------------------|
| 1-2 | Adiabatic compression |
| 2-3 | Constant pressure expansion |
| 3-4 | Adiabatic expansion |
| 4-1 | Constant volume cooling |

الشكل (٤ - ٢١)
دورة ديزل المثالية على مخطط (P-V)

مثال :

في دورة ديزل مثالية كانت درجة الحرارة في بداية عملية الانضغاط (60°C) والضغط $(98.5 \text{ KN} / \text{m}^2)$ وكان أقصى ضغط في الدورة (45 bar) والحرارة المكتسبة $(q_a = 580 \text{ KJ} / \text{kg})$. احسب :

- ١ — نسبة الانضغاط .
 - ٢ — درجة الحرارة في نهاية عملية الانضغاط .
 - ٣ — درجة الحرارة في نهاية عملية الاحتراق .
- افتراض أن $(C_p = 1.003 \text{ KJ} / \text{kg.K})$ وأن $(\gamma = 1.4)$.



الشكل (٤ - ٢٢)
خريطة المبين، الاشتعال بواسطة الانضغاط

$$1 - P_1 V_1^8 = P_2 V_2^8$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{8}} = \left(\frac{45}{0.985} \right)^{\frac{1}{1.4}} = 15.53$$

$$2 - \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{8-1}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{8-1} = (60 + 273) (15.53)^{1.4-1}$$

$$= 992.3 \text{ K}$$

$$3 - q_a = C_p (T_3 - T_2)$$

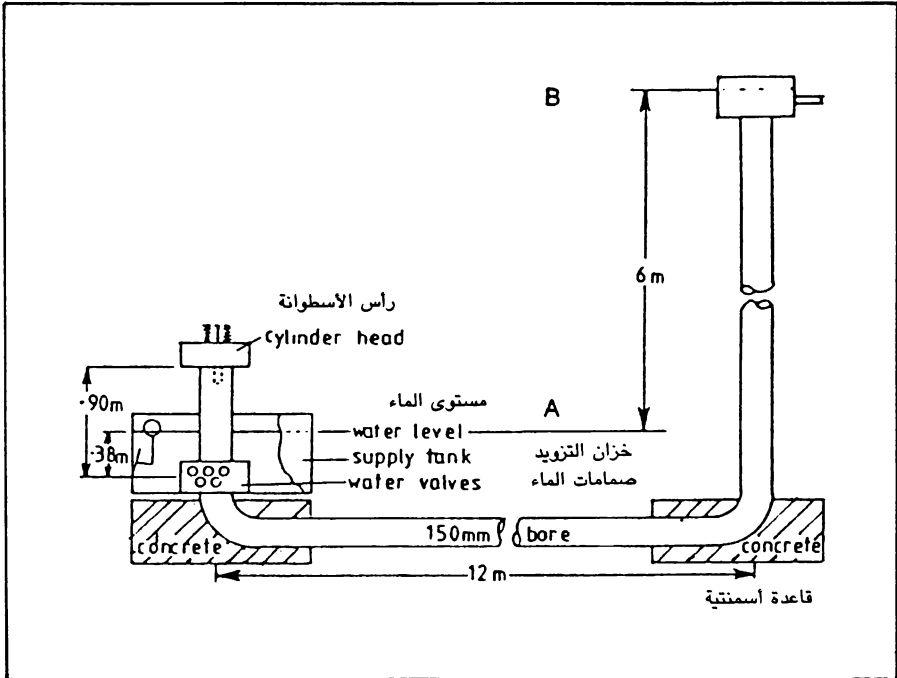
$$580 = 1.003 (T_3 - 992.3)$$

$$T_3 = 1570.6 \text{ K}$$

٤ - ٢ - ٢ مضخة همفري : (Humphrey Pump)

في مضخة همفري ، تعمل طاقة الغازات المحترقة (الغازات المتمددة أثناء الاحتراق) على ضخ المياه مباشرة من دون الحاجة إلى استخدام مكبس واسطوانة لتحويل الطاقة الحرارية والضغط الناتجين عند احتراق الغاز (الوقود) إلى طاقة ميكانيكية دورانية كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي .

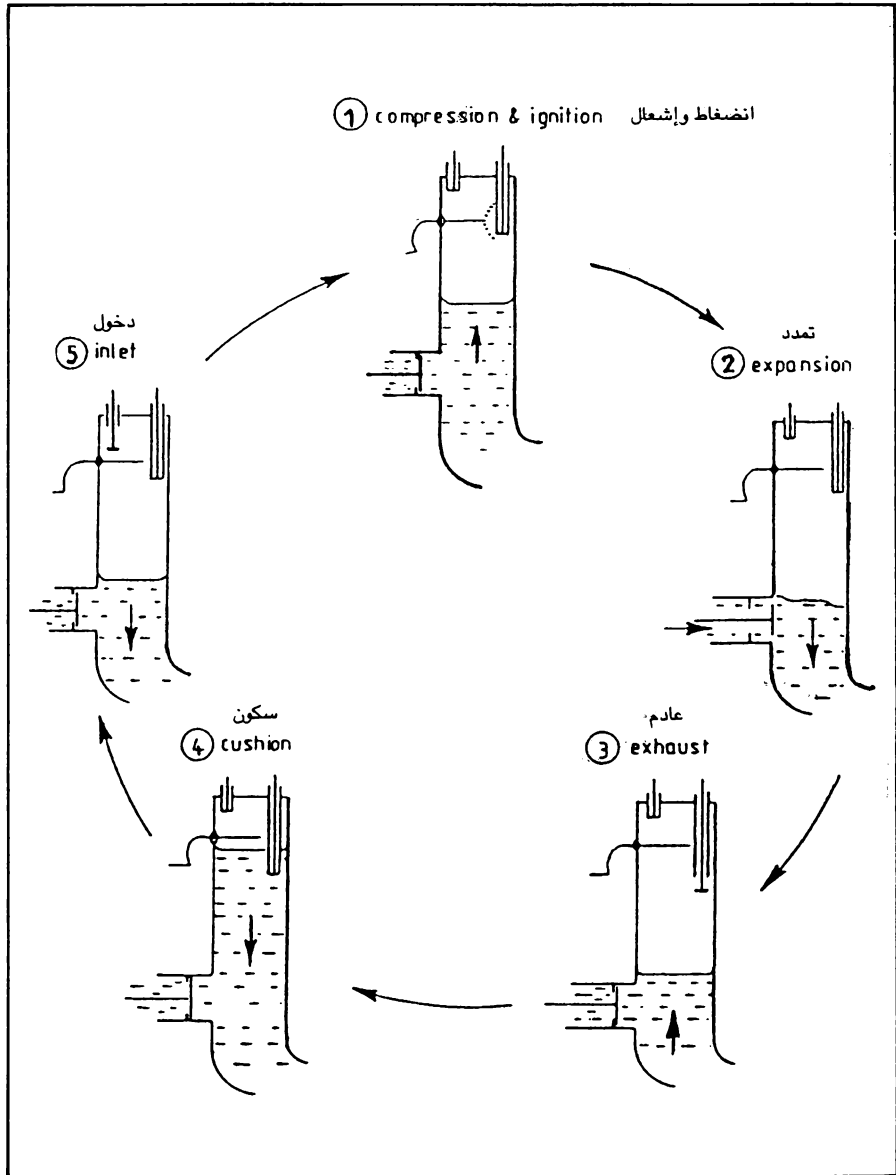
وكما هو مبين في الشكل (٤ - ٢٣) فإن هذه المضخة تتكون أساساً من أنبوب على شكل حرف (U) يتأرجح فيه عمود من الماء طلوغاً ونزولاً عند حرق شحنة من الغاز والهواء بشكل دوري . ويقوم عمود الماء بخزن الطاقة مؤقتاً — كالحداقة — أثناء حركته المتأرجحة .



الشكل (٤ - ٢٣)

رسم تخطيطي مبسط لمضخة همفري يبين المكونات الأساسية
للمضخة التي تقوم برفع الماء من المستوى (A) إلى المستوى (B)

الشكل (٤ - ٢٤) يبين مقطعاً مكبراً لمنطقة سحب الماء والاسطوانة



الشكل (٤ - ٢٤)
الاشواط الأربعة لمضخة همفري

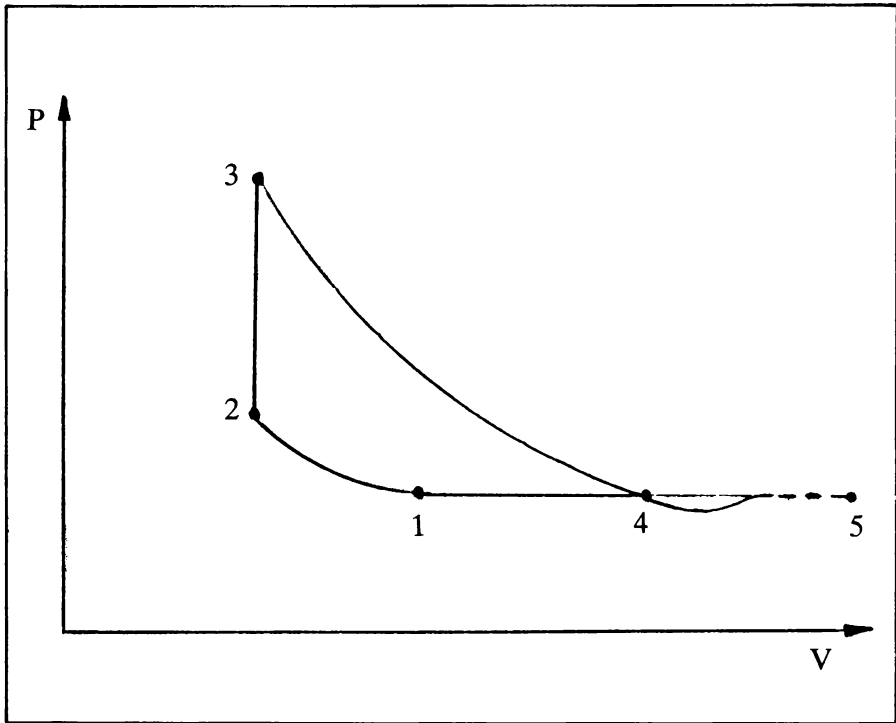
وصمامات المضخة المختلفة بالإضافة إلى أشواط الأداء الأربعة للمضخة وهي :

(1 → 2) انضغاط المزيج من الغاز والهواء بفعل رجوع عمود الماء للأعلى في الاسطوانة نتيجة الاستمرارية في الحركة .

(2 → 3) اشتعال المزيج وارتفاع الضغط فوق عمود الماء .

(3 → 4 → 5) تمدد الغاز المحترق وتحرك عمود الماء هبوطاً في الاسطوانة مما يؤدي إلى انخفاض الضغط داخل الاسطوانة تحت الضغط الجوي في نهاية الشوط وهذا بدوره يؤدي إلى فتح صمام دخول الماء واندفاع الماء من الخزان إلى الاسطوانة .

(5 → 1) رجوع عمود الماء بفعل كمية تحركه التي يمتلكها مما يؤدي إلى



الشكل (٤ - ٢٥)

دورة اتكنسون

خروج الغازات العادمة من صمام الخروج ، ويستمر عمود الماء بالارتفاع حتى يصل إلى مستوى صمام العادم فيقلقه .

الدورة النظرية (المثالية) لمضخة همفري ، هي دورة إتكسون المبينة في الشكل (٤ - ٢٥) ، والكفاءة النظرية لدورة إتكسون تصل إلى ٤٥ ٪ ولكن الكفاءة الفعلية (العملية) لمضخة همفري تتراوح ما بين ١٠ - ٢٠ ٪ وذلك بسبب الفواقد الحرارية المختلفة من الأنابيب والاسطوانة (المضخة) إلى المحيط الخارجي بالإضافة إلى أن جزءاً كبيراً من الطاقة الحرارية تمتصه قطرات الماء الموجودة على جدران الاسطوانة الداخلية عند احتراق مزيج الهواء والوقود الغازي .

٣ - ٤

التوربينات المائية

تقوم هذه التوربينات بتحويل طاقة الوضع في المياه إلى شغل مفيد (طاقة ميكانيكية) ، ويمكن تصنيف التوربينات المائية إلى توربينات رد فعل (Reaction) وتوربينات دفعية (Impulse) والتوربينات مختلطة الجريان (Mixed flow) ومن حيث اتجاه الجريان في التوربين يمكن تصنيفها إلى توربينات ذات جريان قطري ومحوري ومختلط .

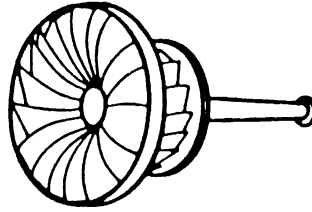
من أشهر التوربينات الرد فعلية توربينات فرانسيس — الشكل (٤ - ٢٦) — وكابلان — الشكل (٤ - ٢٧) — .

ومن أشهر التوربينات الدفعية توربين (دولاب) بلتون — الشكل (٤ - ٢٨) — .

١ — تستعمل التوربينات الدفعية مثل بلتون في حالة الارتفاعات العالية ، التي تزيد عن ٥٠ متراً ويعتبر هذا التوربين ذو كفاءة تحويلية عالية .

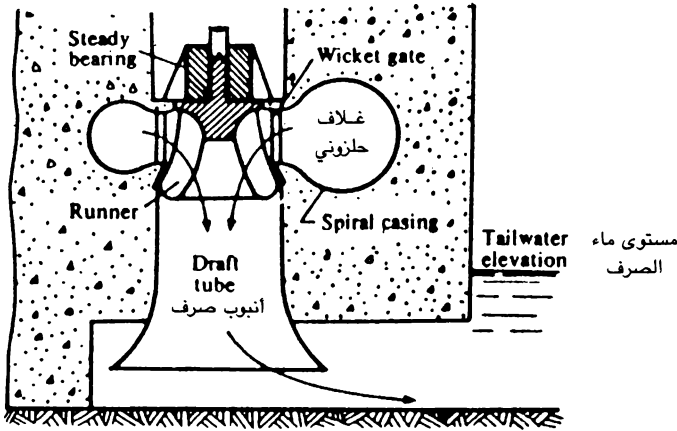
٢ — وتستعمل توربينات رد الفعل مثل توربينات فرانسيس ذات الجريان القطري والمختلط في حالة الارتفاعات المتوسطة (٥ - ٦٠ متراً) . وتعتبر توربينات فرانسيس ذات كفاءة تحويلية — من طاقة مائية إلى ميكانيكية — ممتازة عند الأحمال العادية ولكنها ذات كفاءة منخفضة في حالة الأحمال الجزئية (Part Load) .

أما توربين كابلان ذو الجريان المحوري فإنه يستعمل في حالة الارتفاعات المنخفضة (٣ - ٣٠ متراً) وهو ذو كفاءة تحويلية عالية في حالة الأحمال



View of Francis runner

عضو فرانسيس الدّوّار



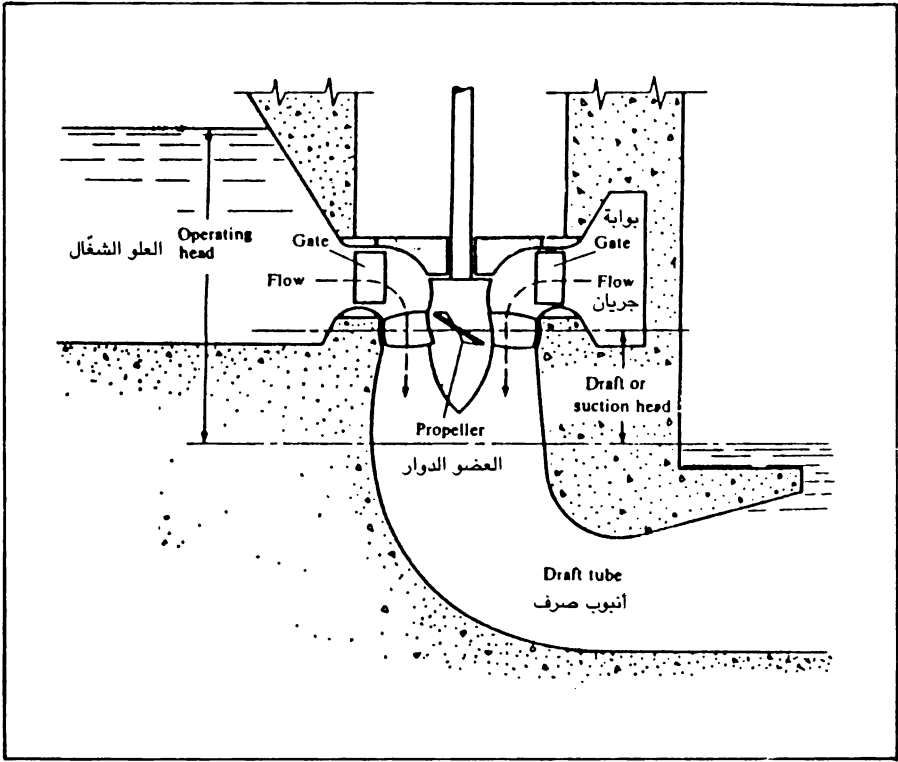
الشكل (٤ - ٢٦)

توربين فرانسيس

التصميمية (Design Load) وذو كفاءة منخفضة في حال الاحمال الجزئية
أو معدلات السريران المنخفضة .

تعطى القدرة المائية (Water power) للتوربينات المائية بالمعادلة :

$$W P = \frac{\rho Q H}{1000} \quad (٤٣ - ٤)$$



الشكل (٤ - ٢٧)
توربين كابلان

حيث :

P : كثافة الماء (1000 kg / m^3)

g : تسارع الجاذبية الأرضية (9.81 m / s^2)

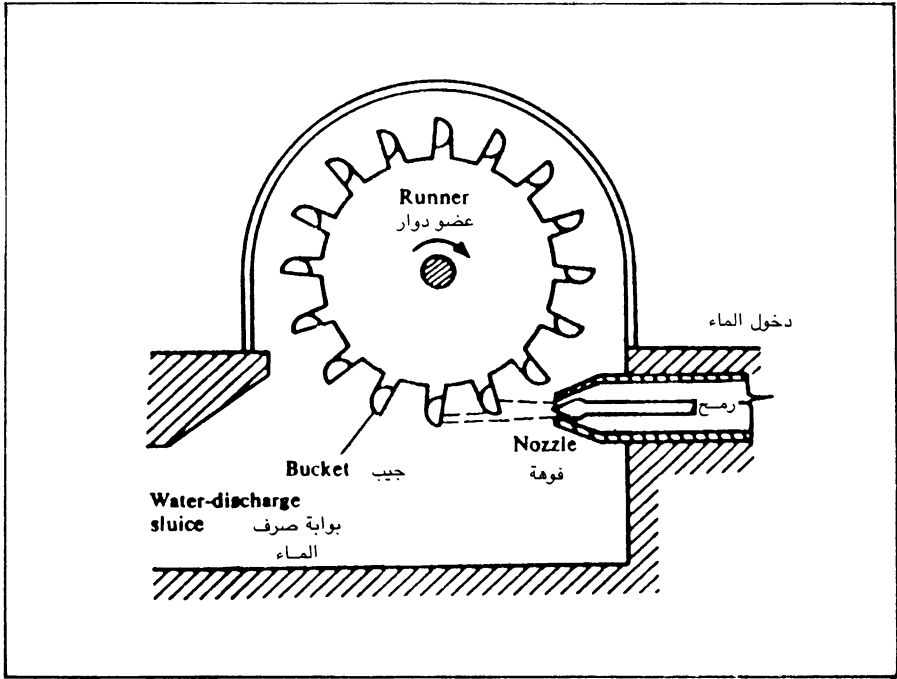
Q : الصرف الحجمي (m^3 / s)

H : ارتفاع الماء الكلي على التوربين (m)

الكفاءة الكلية للتوربين :

$$\eta_t = \frac{B P}{W P}$$

(٤٤ - ٤)



الشكل (٤ - ٢)
توربين (دولاب) بـلتون

حيث :

B P : القدرة الفرملية (K W)

وتعطى القدرة الفرملية بالمعادلة :

$$B P = \frac{F R \pi N}{30000} \quad (٤ - ٤٥)$$

N : سرعة التوربين الدورانية (R P M)

F : القوة الفرملية (N)

R : ذراع الفرملة (m)

مثال :

في توربين بلتون كان ارتفاع الماء المتوافر هو (150 m) والصرف
(0.6 m³ / s) ولإيجاد القدرة الفرملية لزمّت قوة مقدارها (30 K N) لإيقاف
التوربين خلال ذراع عزم طولها (0.5 m) عندما كانت سرعة التوربين
(450 R P M) . احسب الكفاءة التحويلية الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{P g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 0.6 * 150}{1000} = 882.9 \text{ K W}$$

$$B P = \frac{F R \pi N}{30000} = \frac{30 * 10^3 * 0.5 * \pi * 450}{30000} = 706.8 \text{ K W}$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = 0.8$$

مثال :

توربين رد فعلى يدور بسرعة (200 R P M) ويلزمه صرف مقداره
(0.5 m³ / s) تحت علومائي مقداره (40 m) وينتج قدرة فعلية مقداره
(1170 K W) . احسب الكفاءة الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{P g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 5 * 40}{1000} = 1962 \text{ K W}$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = \frac{1170}{1962} = 0.596$$

● ● ●

الفصل الخامس
إنتاج الطاقة الكهربائية

مقدمة الفصل الخامس

المولد الكهربائي عبارة عن جهاز يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. وتستعمل المولدات الكهربائية في الصناعة لإنتاج التيار المستمر (D C) أو التيار المتردد (A C). ففي السيارة مثلاً فإن وظيفة المولد (الدينامو) توليد الطاقة الكهربائية التي تُخزن في المرمك لحين الاستعمال حيث يعمل المرمك في هذه الحالة كمكثف للطاقة الكهربائية .

وفي التطبيقات العملية الكبرى فإن المولدات الكهربائية تُقاد بواسطة توربينات غازية أو بخارية، حيث تصل كفاءة التحويل في بعض هذه المولدات الكبيرة إلى أكثر من ٩٠ ٪ في حين أن هذه الكفاءة قد تنخفض إلى ٥٠ ٪ في المولدات الصغيرة .

٥ - ٢

مبدأ عمل المولد الكهربائي (المنوبة)

يعتمد مبدأ عمل مولد التيار الكهربائي المتردد (A C generator or alternator) على قانون فاراداي (Faraday's law) ، الذي ينص على أن فرقاً في الجهد يتولد في موصل كهربائي يتحرك بشكل متعامد على خطوط مجال مغناطيسي . والصيغة الرياضية لهذا القانون :

$$V = n \frac{d \phi}{d t} \quad (٥ - ١)$$

حيث :

فرق الجهد المتولد في الملف .

V

عدد لفات الملف .

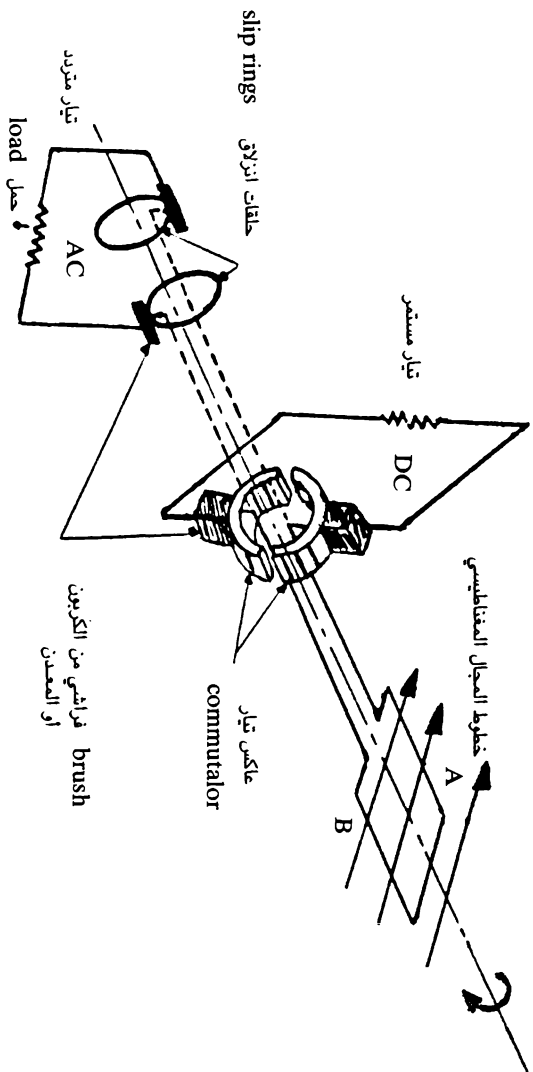
n

معدل التغير الزمني للتدفق المغناطيسي
(Magnatic flux) أو خطوط القوى المغناطيسية
التي يتحرك فيها الملف .

$\frac{d \phi}{d t}$

أما قطبية الجهد المتولد فإنها تحدد بواسطة قانون لنز (Lenz's law) ، الذي ينص على أن فرق الجهد المتولد يكون بحيث أن التيار المتولد عن هذا الجهد يُنتج تأثيراً مغناطيسياً معاكساً للتغير في المجال المغناطيسي الذي يولد فرق الجهد في الملف (قانون الفعل ورد الفعل) .

كما هو مبين في الشكل (٥ - ١) فإن المولد الأساسي يتكون من ملف

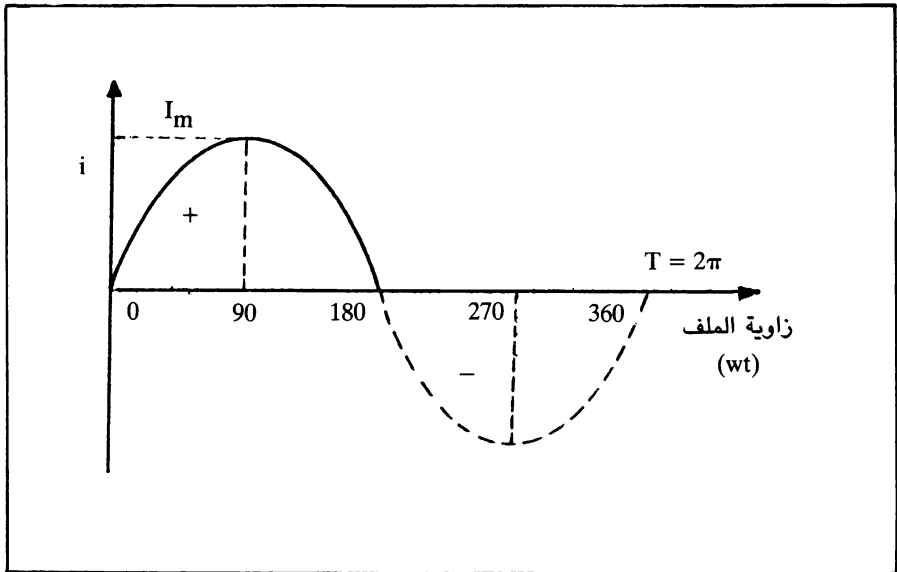


الشكل (١ - ٥)
المولد الكورباني الاساسي

ذي لفه واحدة لموصل كهربائي يدور في مجال مغناطيسي معامد لاتجاه الموصل (السلكان A و B) وللحصول على تيار متردد (A C) فإن طرفي الموصلين (A) و (B) يوصلان بحلقتي انزلاق (Slip rings) مثبتتين على عمود الملف (Coil shaft) ومعزولتين بعضهما عن بعض وعن العمود ، وفي هذا الوضع فإن التيار المتولد يبقى على حاله من دون تغيير، أي على شكل تيار متردد ، يؤخذ من حلقات الانزلاق إلى الحمل الخارجي بواسطة فرشاتين من المعدن أو الكربون تنزلقان على حلقتي انزلاق كما هو مبين في الجزء المنقط من الشكل (٥ - ١) .

تولد الدورة الكاملة للملف (360°) تياراً متردداً يتخذ شكل المنحنى الجيبي (Sine Wave) كما هو مبين في الشكل (٥ - ٢) ونصف هذه الدورة موجب والنصف الآخر سالب (في اتجاه معاكس) .

تعطى قيمة تيار الهيئة الموجبة (تيار المنحنى الجيبي) المبين في الشكل (٥ - ٢) بالمعادلة :



الشكل (٥ - ٢)
تيار المنحنى الجيبي

$$i = I_m \sin \omega t \quad (٥ - ٢)$$

حيث :

i : القيمة اللحظية للتيار (أمبير) .

I_m : القيمة العظمى للتيار أو اتساع (Amplitude) الموجة (أمبير) .

ωt : زاوية الملف مقاسة بالدرجات الكهربائية (Electrical degrees) .

t : الزمن (ثانية) .

ويعرف التردد (f) للموجة بأنه عدد الدورات التي تحدث في وحدة الزمن ، ووحدة التردد هي دورة / ثانية أو الهيرتز (H_z) حيث ان : ($1 H_z = 1 \text{ cycle / s}$) . ومن مضاعفات هذه الوحدة الكيلوهيرتز ($1 k H_z$) و $1000 H_z$ والميغاهيرتز ($1 M H_z = 10^6 H_z$) وتعرف الفترة (T Period) بأنها الزمن — بالثانية — الذي تستغرقه الدورة الواحدة .

$$T = \frac{1}{f} \quad (٥ - ٣)$$

وباستخدام المعادلة ($٥ - ٣$) فإنه يمكن إعادة كتابة المعادلة ($٥ - ٢$) على النحو :

$$i = I_m \sin \left(\frac{2 \pi}{T} t \right) \quad (٥ - ٤)$$

أو :

$$i = I_m \sin (2 \pi f t) \quad (٥ - ٥)$$

حيث ان :

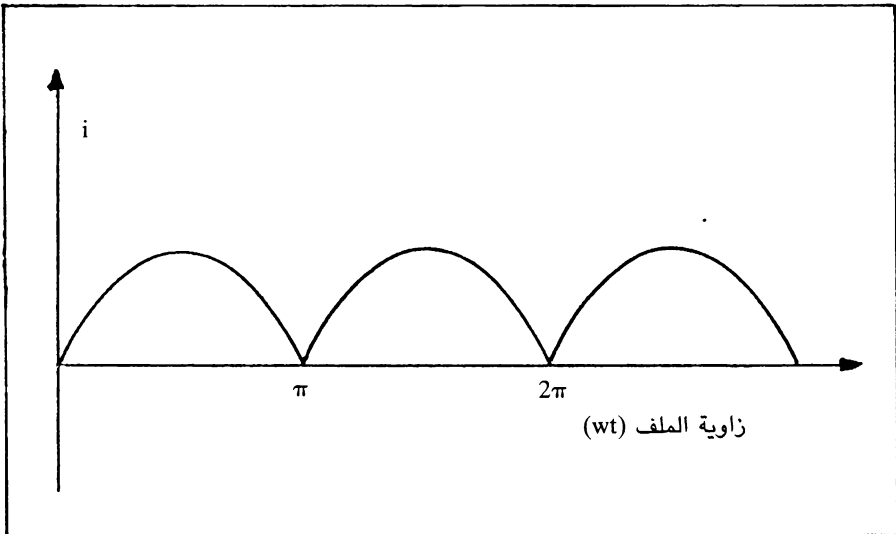
$$\omega = \frac{2 \pi}{T} = 2 \pi f \quad (٥ - ٦)$$

إذا كان الغرض توليد تيار مستمر (D C) فإن ذلك يتم باستبدال حلقات الانزلاق بعاكس التيار (Commutator) كما هو مبين في الشكل (٥ - ١)
 — الخط المتصل — .

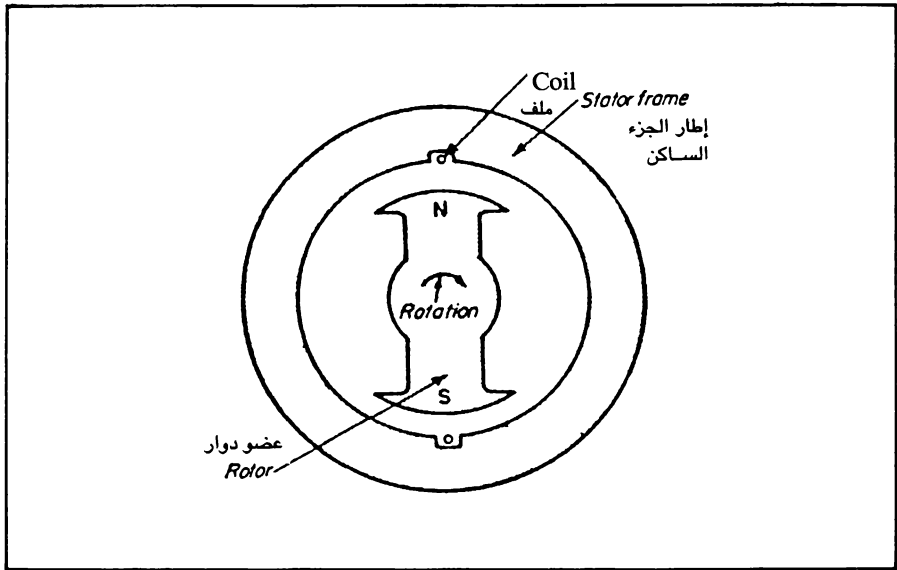
وعاكس التيار عبارة عن حلقتي معدن تقسم كل منهما إلى أجزاء مفردة معزولة بعضها عن بعض وعن العمود المربوطة إليه (عمود الملف) .

في حالة مولد التيار المستمر البسيط (ذي الملف الواحد) فإن عاكس التيار يمكن اعتباره قطعتين فقط تنزلق على كل منهما فرشاة من الكربون وتتصل قطعتي الكربون بسلكين لإكمال الدائرة الكهربائية مع الحمل الخارجي ويكون شكل التيار المتولد من هذا المولد البسيط كما هو مبين في الشكل (٥ - ٣) .

كما هو مبين في الشكل (٥ - ٤) ، يتكون مولد التيار المتردد أو المنوبة (Alternator) من جزئين أساسيين هما الجزء الدوار ويسمى بالعضو الدوار (Rotor) والجزء الساكن (Stator) وفي المنوبات الحديثة فإن ملفات المجال (Field windings) تُربط على العضو الدوار بينما يكون المنتج (Armature) ثابتاً ، ولهذا فإن الفولتية العالية المتولدة تكون في المنتج ، وتزود من المنتج



الشكل (٥ - ٣)
 التيار المتولد في حالة استخدام عاكس تيار مكون من قطعتين فقط



الشكل (٥ - ٤)
المكونات الأساسية لمولد التيار المتردد (المنوبة)

لأحمال الخارجية في حين تستعمل حلقات الانزلاق والفراشي لتزويد التيار المنخفض — مقارنة مع التيار المتولد — المستمر (D C) إلى ملفات العضو الدوار (ملفات المجال المغناطيسي الدوار) ولهذا فإن المنوبة (Alternator) بحاجة إلى مولد تيار مستمر (D C) للقيام بذلك (توفير التيار المستمر) .

وحسب الطور الناتج يمكن تصنيف المنوبات إلى :

١ — أحادية الطور : (Single phase)

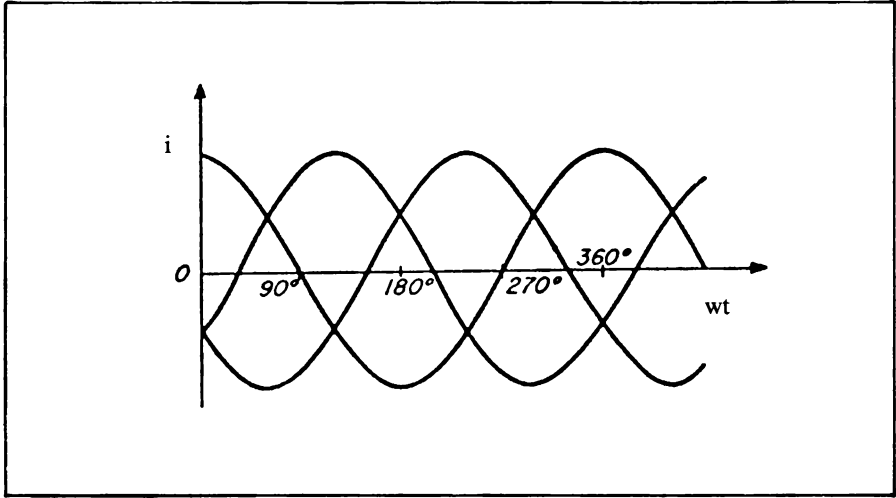
وفي هذه الحالة فإن ملفات المنتج تكون متصلة بعضها مع بعض لجمع الفولتيات المتولدة في كل ملف بشكل منفرد ويكون هناك سلكان نهائيان فقط للمولد لإعطاء الفولتية الناتجة .

٢ — ثنائية الطور : (Two phase)

يضم المنتج مجموعتين من الملفات مرتبة بحيث ان الفولتية أو التيار المتولد في كل سلك من الأسلاك الخارجة من المولد — أحدها مشترك Common — يفصل بينهما زاوية طور (Phase angle) مقدارها ٩٠° .

٣ - ثلاثية الطور : (Three phase)

يضم المنتج ثلاث مجموعات من الملفات مرتبة بحيث ان الفولتيات الخارجة من هذه الملفات يفصل بينها زاوية طور مقدارها 120° كما هو مبين في الشكل (٥ - ٥) ، وفي هذا الترتيب هناك ست أسلاك (ثلاثة أزواج من الأسلاك) للتيار أو الجهد المتولد ، يمكن توصيلها إما بطريقة واي (Y connection) أو بطريقة دلتا (Δ connection) كما هو مبين في الشكل (٥ - ٦) .

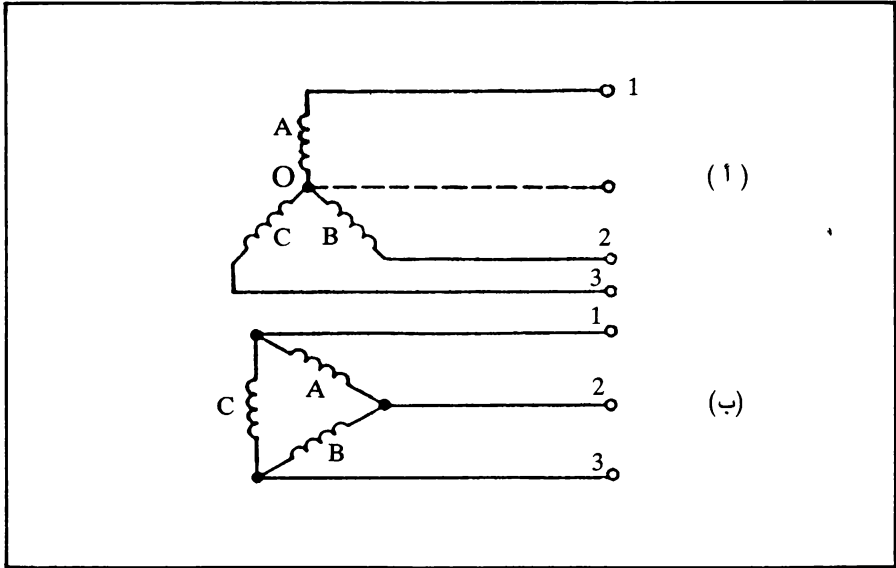


الشكل (٥ - ٥)

التيار أو الجهد المتولد من مولد كهربائي ثلاثي الطور

في توصيلة (Δ) فإن فرق الجهد بين خطين (V_{12}) مثلاً (يسمى الجهد الخلفي) يساوي فرق الجهد في أي ملف (C) و (B) و (A) أي أن ($V_{12} = V_A = V_C$) في حين أن تيار الخط يساوي تيار الملف مضروباً في ($\sqrt{3}$) أي أن ($I_1 = I_A \sqrt{3}$) مثلاً .

وفي توصيلة (Y) فإن فرق الجهد بين خطين (V_{12}) — مثلاً — يساوي فرق الجهد للملف مضروباً في $\sqrt{3}$ أي أن ($V_{12} = \sqrt{3} V_A$) مثلاً ، بينما تيار الخط يساوي تيار الملف وكذلك فإن فرق الجهد للملف يساوي فرق الجهد



الشكل (٥ - ٦)
التوصيلات ثلاثية الطور.
(١) توصيلة واي (Wye) أو ستار (Star)
(٢) توصيلة دلتا (Delta)

بين أي خط والخط المتعادل ، أي أن ($V_B = V_C = V_{10} = V_{20} = V_{30}$)
(V_A

وفي النظام ثلاثي الطور فإن القدرة الكهربائية الناتجة :

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = 3 V_b I_b \cos \theta \quad (٧ - ٥)$$

حيث :

I_L, V_L : جهد و تيار الخطوط على الترتيب .

I_C, V_C : جهد و تيار الفروع (الملفات) .

$\cos \theta$: معامل القدرة (Power factor) .

أما العلاقة بين السرعة الدورانية للمولد (N) والتردد الناتج (f) فهي :

$$N = \frac{120 f}{n_p} \quad (٥ - ٨)$$

حيث :

N : السرعة الدورانية للمولد (R P M) دورة / دقيقة .

f : تردد التيار المتولد (H_z) هيرتز .

n_p : عدد الاقطاب الموجودة على العضو الدوار للمنوبة

(Alternator) .

٥ - ٣

الطرق المباشرة لتوليد الطاقة الكهربائية

٥ - ٣ - ١ التوليد الكيميائي :

إن المراكم (البطاريات) وخلايا الوقود (Fuel cells) هما نظامان تتحول فيهما الطاقة الكيميائية المخزنة إلى طاقة كهربائية مباشرة دون الحاجة إلى المرور عبر التحول إلى طاقة حرارية ، ولهذا فإن عملية التحويل هذه لا يحدها القانون الثاني للثيرموديناميكا الحرارية ، أي أنها لا تخضع لقانون أقصى كفاءة للآلة الحرارية اللارجاعية ($\eta = 1 - T_L / T_H$) ، ولهذا السبب فإن هذين النظامين يلاقيان الاهتمام وتكثر البحوث عنهما .

تشابه المراكم وخلايا الوقود في عملها مع وجود فرق رئيس ، وهو أن المرمك يحتوي على كمية محدودة من الوقود أو الطاقة الكيميائية في حين أن خلية الوقود تعمل تحت تزويد مستمر للوقود . بعض المراكم هي أجهزة انعكاسية ، أي أن نواتج التفاعل الكيميائي يمكن إعادة شحنها (فصلها) إلى مكوناتها الأصلية بواسطة تزويد البطارية بالكهرباء في عملية إعادة الشحن (Recharging) ، ولكن خلايا الوقود لا يمكن إعادة شحنها لأن نواتج التفاعل الكيميائي يتم التخلص منها باستمرار ، وتستخدم المراكم كأنظمة خزن للطاقة ويمكن تقسيمها إلى قسمين رئيسيين :

١ - المراكم الأولية (Primary batteries) .

٢ - المراكم الثانوية (Secondary batteries) .

والمراكم الأولية لا يمكن عادةً إعادة شحنها ولكن المراكم الثانوية — مثل المرمك الرصاصي في السيارات — فإنه بالإمكان إعادة شحنها .

تتشابه خلية الوقود مع المرمك في التركيب من حيث ان لكل منهما قطبان (Electrodes) بينهما سائل أيوني (Electrolyte solution) والذي هو عبارة عن محلول يتحلل كهربائياً في خلايا الوقود . يتم تغذية المتفاعلات من الوقود — الهيدروجين أو أول أكسيد الكربون غالباً — لأحد الأقطاب المسامية (Porous electrode) بينما يتم تغذية الأكسجين أو الهواء للقطب المسامي الآخر .

وتقوم الأقطاب في خلايا الوقود بثلاث مهمات :

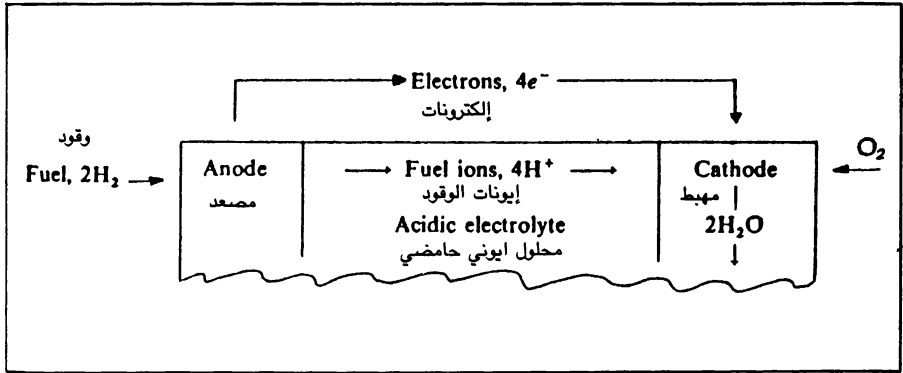
١ — يجب أن يكون القطب مسامياً بحيث ان الوقود والسائل الأيوني تكون قادرة على اختراقه لتحقيق أفضل اتصال بينهما . تعد أحجام المسامات (Pore size) للأقطاب ذات أهمية بالغة في خلايا الوقود، فإذا كانت هذه الأحجام كبيرة ، فإن الوقود الغازي يكون فقاعات في هذه المسامات مما يؤدي إلى هدر الوقود، وإذا كانت هذه المسامات صغيرة الحجم كثيراً ، فإنه لا يتم تحقيق اتصال كافٍ بين المتفاعلات والسائل الأيوني مما يؤدي إلى خفض سعة المرمك .

٢ — يجب أن يحتوي القطب على عوامل مساعدة كيميائية (Chemical catalysts) تقوم بتكسير مركبات الوقود إلى ذرات ليكون الوقود أكثر فعالية . وأكثر أنواع العوامل المساعدة استعمالاً هي البلاتين (Platinum) والنيكل .

٣ — يجب أن تكون الأقطاب قادرة على إيصال الإلكترونات إلى النهايات (Terminals) كما يجب أن يكون السائل الأيوني ذا نفاذية عالية (Highly permeable) لكل من أيونات (H^+) أو (OH^-) والتي تتولد كنواتج وسطية على إحدى الأقطاب .

وينتقل الايون (H^+ أو OH^-) إلى القطب الآخر عبر السائل الأيوني ليتحد مع المتفاعل الآخر بينما تنتقل الإلكترونات خلال أسلاك الدائرة الخارجية إلى القطب الآخر حيث يتكون ناتج التأكسد .

إذا كانت خلية الوقود تحرق الأكسجين والهيدروجين وتحتوي على محلول أيوني حامضي — الشكل (٥ - ٧) — فإن الايون الوسطي الناتج هو (H^+) وتكون تفاعلات الخلية العامة :



الشكل (٥ - ٧)

تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني حامضي

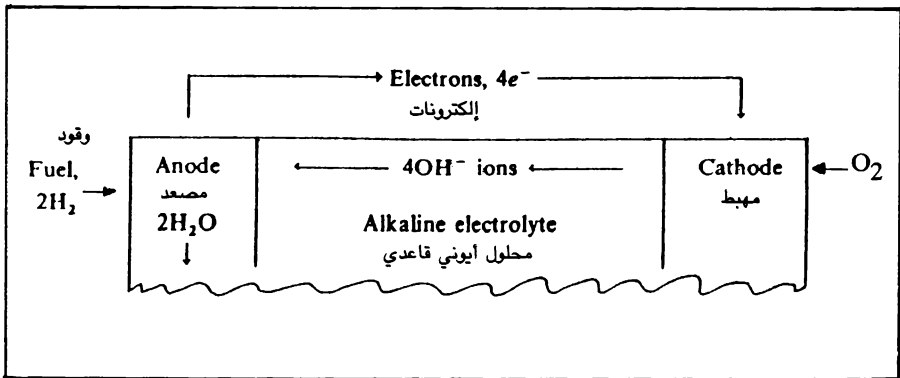
تفاعل المصعد :

The anode reaction is: $2 H_2 \rightarrow 4e^- = 4 H^+$

تفاعل المهبط :

The cathode reaction is: $4e^- = 4 H^+ + O_2 \rightarrow 2 H_2 O$

وإذا كانت خلية الوقود (أكسجين - هيدروجين) تستخدم محلول ايوني قاعدي (Alkaline electrolyte) كهيدروكسيد البوتاسيوم - الشكل (٥ - ٨) - فإن الايون الوسطي هو ($O H^-$) وتكون تفاعلات الخلية العامة :



الشكل (٥ - ٨)

تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني قاعدي

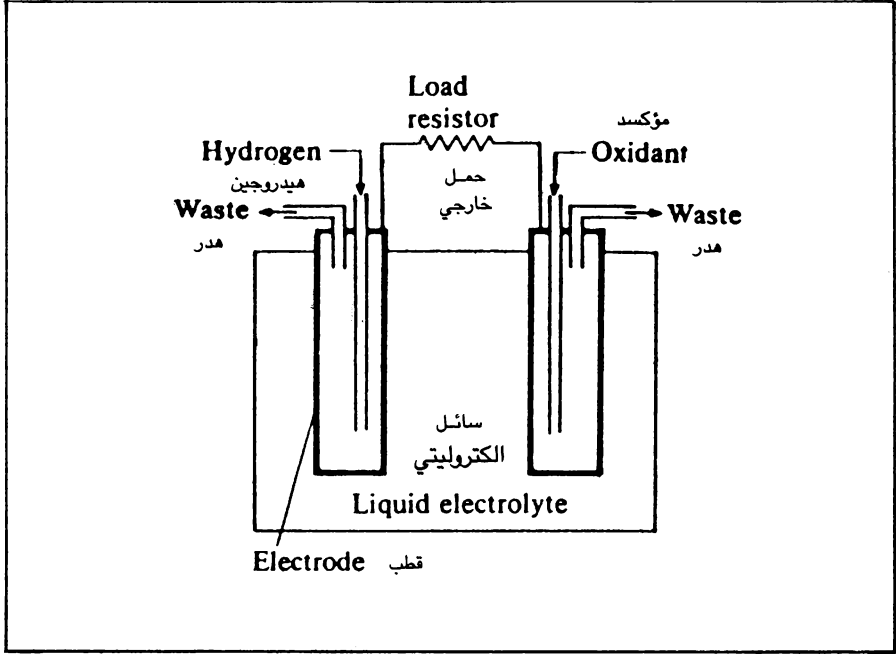
تفاعل المصعد :

The anode reaction is: $2 \text{H}_2 + 4 \text{O} \text{H}^- \rightarrow 4 \text{H}_2 \text{O} + 4 \text{e}^-$

تفاعل المهبط :

The cathode reaction is: $2 \text{H}_2 \text{O} + \text{O}_2 + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{O} \text{H}^-$

الشكل (٥ - ٩) يبين رسماً تخطيطياً لخلية وقود نموذجية .



الشكل (٥ - ٩)

رسم تخطيطي لخلية وقود نموذجية

— أنواع خلايا الوقود :

معظم خلايا الوقود العاملة هي خلايا ذات درجة حرارة منخفضة تستخدم الهيدروجين والأكسجين كمتفاعلات وتقل درجة حرارتها العاملة عن ٥٠٠ كلفن .

إن تخفيض درجة الحرارة العاملة يحسن الكفاءة التحويلية بينما يزداد

معدل التأكسد أو القدرة الناتجة للخلية بزيادة ضغط أو درجة حرارة النظام أو كليهما . إن خلية الوقود الناجحة يجب أن تحقق شرطين أساسيين ، هما :

١ - الثبات : (Invariance)

وتتضمن هذه الصفات قدرة النظام على الاستمرار بالعمل لفترة طويلة بموثوقية وبدون حدوث تلف للعوامل المساعدة نتيجة لوجود الشوائب في المتفاعلات أو انسداد (Logging) لمسامات الأقطاب أو تكون للفقااعات أو تداخل واختلاط للمتفاعلات (Inter diffusion) .

٢ - التفاعلية : (Reactivity)




وتقتضي هذه الصفة الحصول على أقصى طاقة ممكنة من التفاعلات الكيماوية عند معدلات تفاعل مرتفعة نسبياً ، ولهذا فإنه من المهم أن تتأكسد جميع ذرات الوقود بشكل كامل خلال عمل الخلية ، ويمكن زيادة معدل التفاعل باستعمال أقطاب مسامية كبيرة حتى يكون سطح التفاعل بين الغاز والمحللول الايوني أكبر ما يمكن، كما يمكن زيادة معدل التفاعل بزيادة الضغط العامل أو درجة الحرارة العاملة أو كليهما ، ولسوء الحظ فإن الخطوات المتخذة لزيادة معدل التفاعل تتعارض مع متطلبات الثبات للخلية .

٥ - ٣ - ٢ التوليد الكهروضوئي :

يمكن تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية — مباشرة — إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلية الكهروضوئية (Photovoltaic-cell) والتي تسمى عادة بالخلية الشمسية (Solar cell) . وكما هو الحال بالنسبة لخلية الوقود فإن الكفاءة التحويلية لهذا النظام غير محدودة بكفاءة المحرك الحراري الإرجاعي القصوى التي يحكمها القانون الثاني. وعلى الرغم من ذلك، فإن كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية محدودة بقيم منخفضة نسبياً .

ينصب الاهتمام الأساسي على إمكانية تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية — من الشمس مباشرة — إلى كهرباء ، فعمل الخلية الكهروضوئية (الخلية الشمسية) يعتمد على استغلال الوصلة الثنائية P -n (P-n Junction) التي تتكون من مادتين شبه موصلتين (Semi-Conductors) .

إن أكثر مادتين شبه موصلتين أهمية في علم الإلكترونيات هما السيلكون (Si) والجرمانيوم (Ge) . يقع هذان العنصران في العمود الرابع من

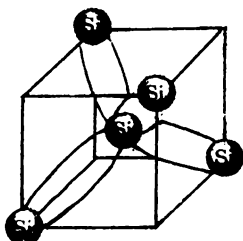
		
5 B BORON 10.82	6 C CARBON 12.01	7 N NITROGEN 14.008
13 Al ALUMINUM 26.97	14 Si SILICON 28.09	15 P PHOSPHORUS 31.02
31 Ga GALLIUM 69.72	32 Ge GERMANIUM 72.60	33 As ARSENIC 74.91
49 In INDIUM 114.8	50 Sn TIN 118.7	51 Sb ANTIMONY 121.8

الجدول (٥ - ١)
العناصر شبه الموصلة في الجدول الدوري

الجدول الدوري، ولكل منهما أربع إلكترونات تكافؤ (إلكترونات حرة في مداره الأخير) كما هو مبين في الجدول (٥ - ١) ، الذي يوضح جزءاً من الجدول الدوري الذي يظهر فيه هذان العنصران .

يتخذ التركيب البلوري لكل من عنصري السيليكون والجرمانيوم شكلاً رباعي السطوح (Tetrahedral) كما هو مبين في الشكل (٥ - ١٠) حيث ترتبط كل ذرة من ذرات البلورة بأربعة ذرات مجاورة لها، كما هو مبين في الشكل (٥ - ١١) . تلزم طاقة مقدارها حوالى (1.1 e V) للسيليكون وطاقة مقدارها حوالى (0.7 e V) للجرمانيوم لكسر الرابطة التساهمية أو المشتركة في كل منهما .

وعند كسر إحدى الروابط التساهمية في البلورة يتحرر أحد الإلكترونات



الشكل (٥ - ١٠)
الشكل رباعي السطوح لبلورة السيلكون

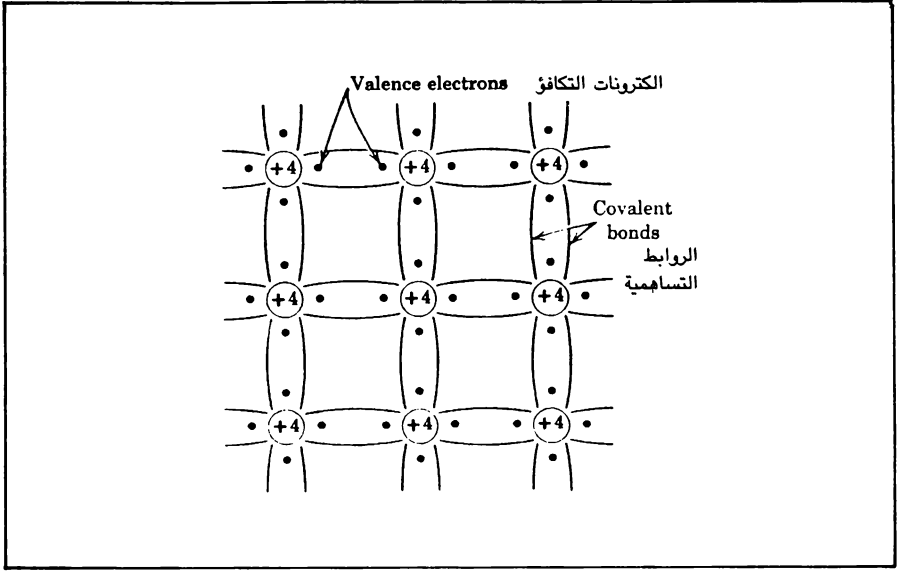
(يصبح حر الحركة في البلورة) ويترك وراءه فجوة (Hole) ذات شحنة موجبة .

ويساهم كل من الإلكترونات الحرة والفجوات في عملية التوصيل الكهربائي بشكل مستقل ، حيث انه يمكن الافتراض بأن الفجوات — موجبة الشحنة — تتحرك باتجاه معاكس لحركة الإلكترونات الحرة في البلورة . الشكل (٥ - ١٢) يبين بلورة سيلكون بإلكترون حُر وفجوة نتيجة لكسر إحدى الروابط التساهمية .

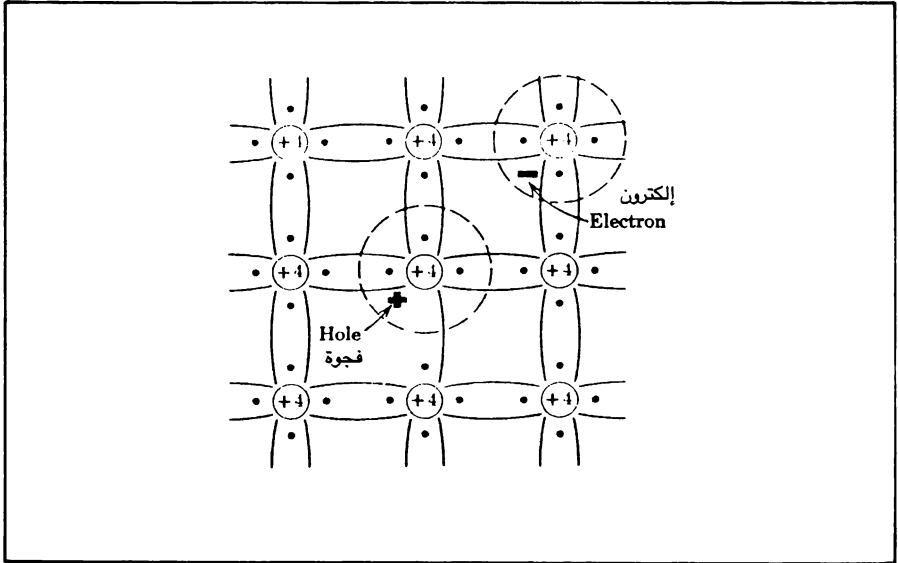
في المادة شبه الموصلة النقية يكون عدد الإلكترونات الحرة مساوياً لعدد الفجوات، وعلى درجات الحرارة العادية فإن جزءاً بسيطاً من إلكترونات التكافؤ تكون جاهزة للتوصيل (الإلكترونات الحرة) .

يمكن زيادة تركيز الحاملات الحرة (Free carriers) في المادة شبه الموصلة وبالتالي زيادة موصليتها وذلك بزيادة درجة حرارتها ، ويمكن زيادة هذه الموصلية بشكل أكبر (والتحكم بهذه الزيادة) بإضافة كميات قليلة من الشوائب (Impurities) لهذه المادة في عملية تسمى بعملية التطعيم (Doping) .

فعند إضافة كميات قليلة من عنصر له خمس إلكترونات تكافؤ كالفسفور (P) إلى عنصر السيلكون النقي فإن ذرات الفوسفور (المادة الشائبة) تحل محل بعض ذرات عنصر السيلكون في البلورة وتشارك ذرة المادة الشائبة ذرات السيلكون المجاورة لها بأربعة روابط بينما يبقى الإلكترون الخامس من إلكترونات التكافؤ حراً ، وتسمى المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه بالمادة شبه الموصلة



الشكل (١١ - ٥)
تمثيل ثنائي - البعد لذرات السيلكون في البلورة



الشكل (١٢ - ٥)
بلورة سيلكون برابطة تساهمية غير مكتملة (مكسورة)

الواهة (Danor) أو المادة شبه الموصلة من نوع n- (n-Type) كما هو مبين في الشكل (٥ - ١٣) .

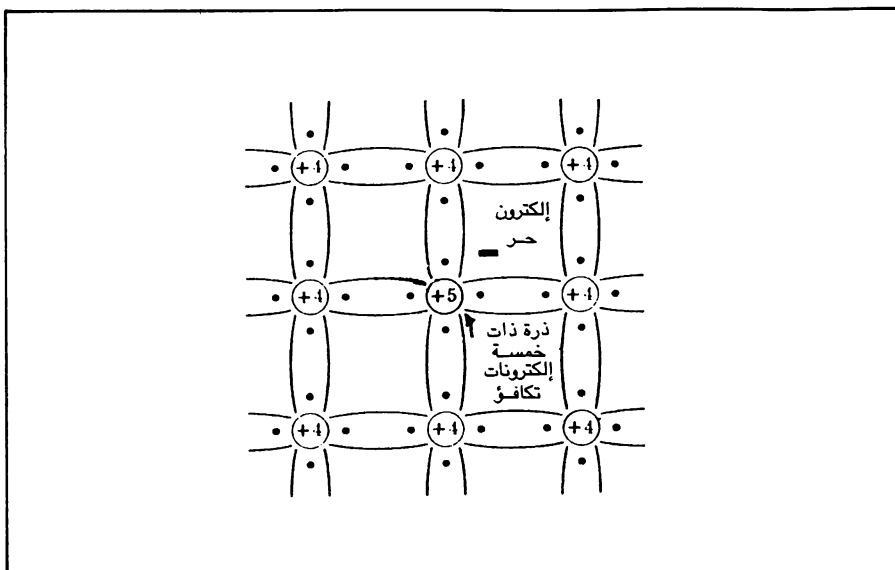
وفي حالة إضافة مادة شائبة ذات ثلاثة إلكترونات تكافؤ كالألومنيوم (Al) إلى بلورة السيلكون فإن المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه تسمى بالمادة شبه الموصلة القابلة (Acceptor) أو المادة شبه الموصلة نوع P- (P-Type) كما هو مبين في الشكل (٥ - ١٤) .

وكما هو واضح في الشكل فإن المادة الشائبة تشارك بثلاث روابط مع ثلاث ذرات من السيلكون المجاورة لها بينما تبقى الرابطة الرابعة غير مكتملة مما يؤدي إلى إيجاد فجوة (شحنة موجبة) في البلورة .

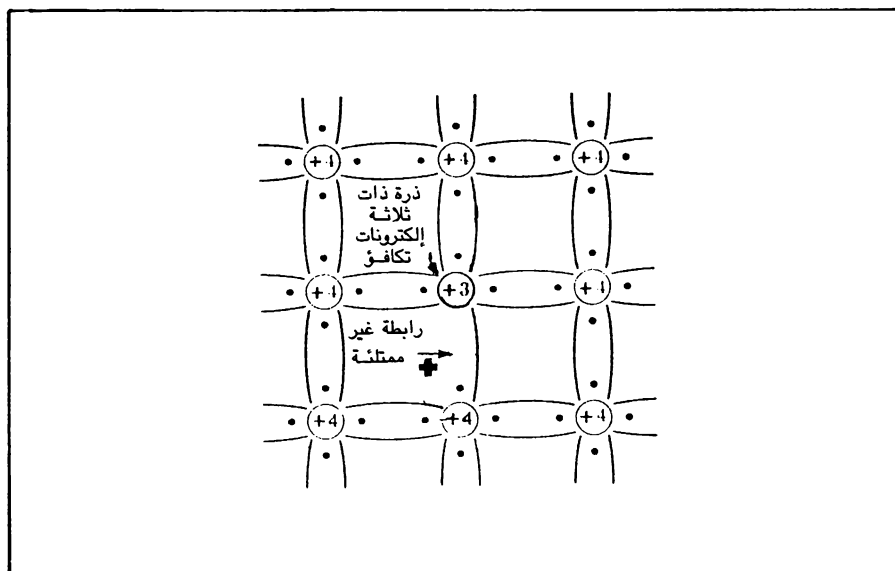
عند إلصاق مادة من نوع n- (ذات شحنة سالبة) بأخرى من نوع P- (ذات شحنة موجبة) تنتقل الإلكترونات عبر السطح الفاصل (سطح الالتصاق) من المادة n- إلى المادة P- لملء الفجوات الموجبة فيها . ونتيجة لهذا الانتقال يرتفع الجهد للمادة من نوع n- وينخفض الجهد للمادة من نوع P- حتى يصل الفرق في الجهد بين المادتين حداً معيناً تتوقف عنده عملية انتقال الإلكترونات عبر السطح الفاصل ، وتسمى الوصلة المؤلفة من مادتين ملتصقتين إحداهما من نوع n- والأخرى من نوع P- بالوصلة الثنائية P-n (P-n Junction) . الشكل (٥ - ١٥) يبين رسماً تخطيطياً لوصلة (P-n) الثنائية ويظهر الشكل آلية توصيل الشحنات عبر السطح الفاصل بين المادتين شبه الموصلتين .

تتكون الخلية الشمسية عادة من وصلة (P-n) ثنائية كما هو مبين في الشكل (٥ - ١٦) .

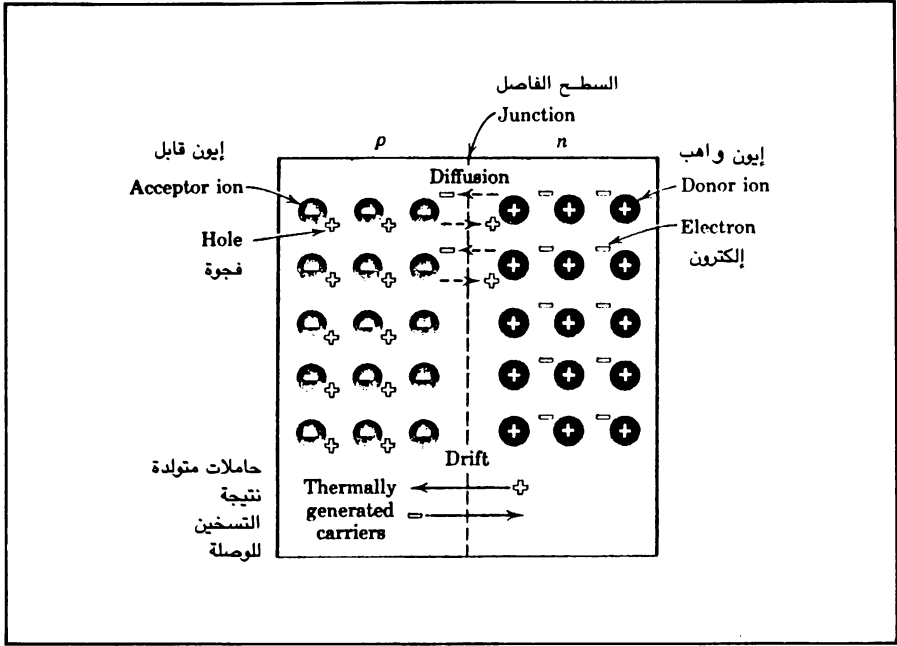
عندما تسقط الفوتونات الضوئية من أشعة الشمس على الخلية الشمسية فإنها تتفاعل مع الإلكترونات الحرة (إلكترونات التكافؤ) للوصلة الثنائية (P-n) وتكسبها الطاقة اللازمة لإثارتها أو تنشيطها (Excitation energy) وينتج عن هذا التفاعل بين الإلكترونات والفوتونات — التي تمتلك الطاقة اللازمة للإثارة — تجمع للشحنات الموجبة (الذرات التي فقدت إلكتروناتها) في شبه الموصل نوع n- . وإذا وصلت المادتان (n) و (P) بدائرة خارجية فإن الإلكترونات تسري في هذه الدائرة من مادة n- إلى مادة P- لتُعادِل الشحنات الموجبة فيها ، أي أنه يتولد تيار كهربائي في الدائرة الخارجية يسري من مادة P- إلى مادة n- ، وهكذا تقوم هذه الخلية الشمسية بتحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية .



الشكل (٥ - ١٣)
تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الخامسة



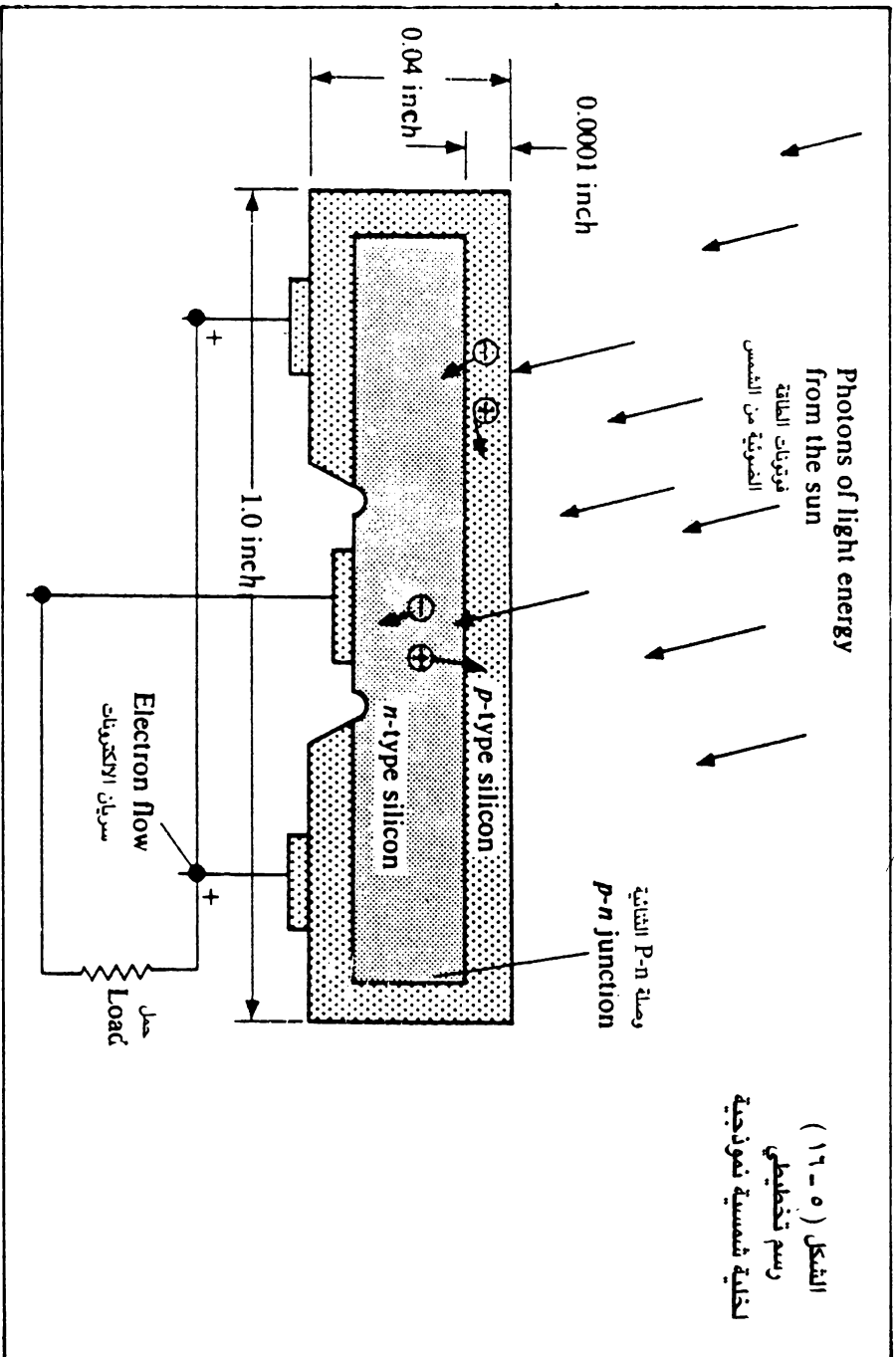
الشكل (٥ - ١٤)
تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الثالثة



الشكل (١٥ - ٥)
رسم تخطيطي لوصلة P-n الثنائية

هناك نوعان من الفواقد الرئيسية هما فقد الوصلة (Junction Loss)
والفقد الطيفي (Spectrum Loss) . ويعود فقد الوصلة إلى تدفق الحاملات
الفرعية (Minority carriers) في الوصلة. وعلى الرغم من أن معدل تدفق هذه
الحاملات أقل بكثير من معدل تدفق الحاملات الرئيسية (Majority carriers)
إلا أنه لا يمكن إهماله حيث أن هذا الفقد يخفض كفاءة الخلية الشمسية بحوالي
٥٠ ٪ .

أما الفقد الطيفي فيكون مصاحباً لطيف الطاقة للفوتونات الساقطة والطاقة
المنشطة لمادة شبه الموصل حيث أن بعض هذه الفوتونات يمتلك طاقة أكبر من
تلك اللازمة للإثارة أو التنشيط (١,١ إلكترون - فولت لخلية السيلكون) فتتحول
الطاقة الزائدة إلى طاقة حرارية وبعضها يمتلك طاقة أقل من تلك اللازمة للإثارة
فتتحول طاقتها إلى طاقة حرارية لا تساهم في توليد الطاقة الكهربائية في الخلية .



الشكل (١٦ - ٥)
رسم تخطيطي
لخلاية شمسية نموذجية

وهناك عدد من الفوائد الثانوية تصاحب عمل الخلية الشمسية وتشمل انعكاس الفوتونات عن الخلية وعودة الايونات للاتحاد مع بعضها (Recombination) قبل وصولها للحد الفاصل بين المادتين (n) و (P) والفقد الناتج عن عملية تسخين جول ، خصوصاً في الطبقات الخارجية للمادة شبه الموصلة . وبأخذ جميع الفوائد بعين الاعتبار ، فإن أقصى كفاءة ممكنة للخلية هي ٢٥ ٪ بينما تتراوح الكفاءة العملية المعروفة للخلايا الشمسية المستخدمة ما بين ١٥ — ٢٠ ٪ .

وللخلايا الشمسية عدد من الفوائد — مقارنة مع أنظمة التحويل الشمسية الأخرى — فهي بسيطة وصغيرة الحجم ولها نسبة (قدرة / وزن) عالية مما يجعل استخدام هذه الخلايا مغر في التطبيقات الفضائية . كذلك فإن الخلايا الشمسية ليس بها أجزاء متحركة ولها كفاءة تحويلية عالية — من طاقة شمسية إلى طاقة كهربائية — .

نظرياً ، فإن عمر الخلية الشمسية غير محدود ، وعملياً فإنها تعاني مع الزمن من تلف شعاعي ناتج عن جسيمات عالية الشحنة قادمة من الفضاء مثل الإلكترونات الناتجة عن حزام فان ألن الإشعاعي حول الأرض (Van Alen radiation belt) .

أهم مشاكل الخلايا الشمسية هو تكاليف إنتاجها الباهظة وتصنيعها ، كذلك الحاجة إلى وجود نظام تخزين لهذه الخلايا وذلك لتوفير الطاقة الكهربائية في الليل وفي الأيام الغائمة .

٥ - ٣ - ٣ التوليد باستخدام طاقة الرياح :

إن أهم ما يميز الرياح كمصدر لتوليد الطاقة الكهربائية هو أن الطاقة الموجودة في الرياح تتناسب مع مكعب سرعة هذه الرياح . فالقدرة التي تمتلكها كتلة من الرياح مقدارها (m) وتتحرك بسرعة مقدارها (V) وكثافتها مقدارها (ρ) وتمر خلال مروحة هوائية ذات محور دوران أفقي (Horizontal axis wind turbine) مساحتها (المساحة الدائرية التي تشملها شفرات المروحة خلال دورانها) مقدارها (A) هي :

$$\text{Power} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (٩ - ٥)$$

وقد أظهرت الحسابات التي قام بها الباحث بتز (Betz) عام ١٩١٩ أن أقصى نسبة من الطاقة الحركية التي يمكن استخلاصها من الرياح تساوي ١٦ / ٢٧ (٠,٥٩٣) من القدرة الموجودة ، وهكذا فإن القدرة العظمى للتوربين الهوائي :

$$\text{Theoretical maximum power out put} = 0.297 P A V^3 \quad (١٠ - ٥)$$

ولكن الفواقد التي تصاحب عمليات تحويل الطاقة تؤدي إلى تخفيض هذه القيمة بنسب متفاوتة حسب نوع التوربين الهوائي ، وتبلغ نسبة التخفيض عادة حوالى ثلثي النسبة النظرية العظمى .

أي أن :

$$\text{Available power out put} = \left(\frac{2}{3}\right) 0.297 P A V^3 \simeq \quad (١١ - ٥)$$

$$V^3 0.2 P A$$

وإذا افترضنا أن قطر المروحة الهوائية هو (D) ، فإن المعادلة (١١ - ٥) تصبح :

$$\text{Available power out put} = 0.05 \pi P D^2 V^3 \quad (١٢ - ٥)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن قدرة الرياح المتوافرة عند سرعة معينة تتناسب مع مربع قطر المروحة الهوائية

ومن المتغيرات الشائع استعمالها في حسابات طاقة الريح :

معامل القدرة (Power coefficient C_p)

$$C_p = \frac{\text{Power out put of wind turbine}}{\frac{1}{2} P A V^3} \quad (١٣ - ٥)$$

ومعامل القدرة الكلي (Overall power coefficient C_{po})

$$C_{po} = \frac{\text{Power out put at generator}}{\frac{1}{2} P A V^3} \quad (١٤ - ٥)$$

ومن المعادلة الأخيرة نجد أن معامل القدرة الكلي يشمل الفواقد الناتجة عن

عمليات نقل القدرة — بواسطة التروس — وكفاءة التحويل للمولد الكهربائي .

ولتوليد تيار كهربائي متردد (A C) ، فإن التوربين الهوائي يجب تصميمه للعمل بسرعة دورانية ثابتة وذلك للحصول على تردد ثابت للتيار .

وهناك عدة أنواع من التوربينات الهوائية، وتشمل هذه الأنواع التوربينات ذات السريان المحوري (Axial flow turbines) والتوربينات ذات السريان القطري (Radial turbines) المربوطة على محور عمودي . الشكل (٥ - ١٧) يبين نوعين من مراوح (الأعضاء الدوارة) التوربينات الهوائية .

يجب تصميم التوربينات الهوائية بحيث تكون نسبة (القدرة / الوزن) أكبر ما يمكن لتقليل الاجهادات المتولدة في شفرات المروحة الهوائية الناتجة عن قوة الطرد المركزي .

يواجه نظام توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح بعض المشاكل التي لا يمكن تجنبها ، فإذا كان الغرض هو توليد تيار كهربائي متردد (A C) فإن ذلك يتطلب توافر سرعة دورانية ثابتة وقوة ثابتة لمروحة التوربين ، ولسوء الحظ فإن سرعة الرياح ليست ثابتة لا في المقدار ولا في الاتجاه ، كذلك فإنها تتغير من قاع إلى قمة المروحة في حالة كون المروحة الهوائية ذات قطر كبير نسبياً مما يؤدي إلى عدم ثبات سرعة المولد ، كذلك فإنه يخلق إجهادات داخلية متغيرة في شفرات المروحة تؤدي إلى إضعافها وإجهادها مع الزمن .

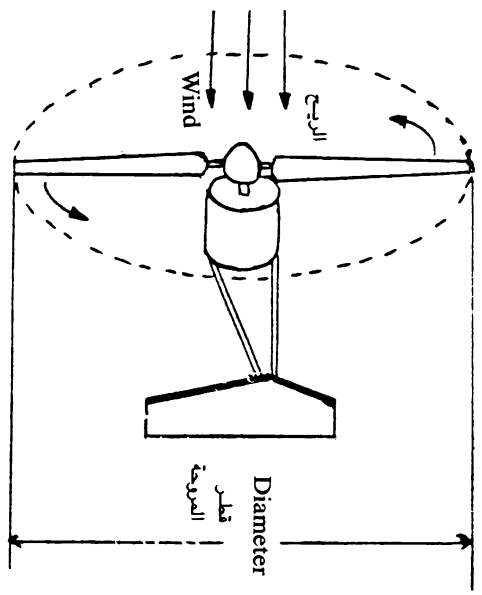
وأحياناً تضعف سرعة الرياح لدرجة أنها لا تكفي لتوليد الطاقة الكهربائية مما يقتضي وجود نظام تخزين للطاقة .

وعلى الرغم من جميع هذه المشاكل فإن توليد الطاقة من الرياح — خصوصاً الطاقة الكهربائية — يلاقي اهتماماً وتستمر البحوث بصدد ذلك لكون طاقة الرياح طاقة نظيفة وغير ملوثة للبيئة . الشكل (٥ - ١٨) يبين رسماً تخطيطياً لنظام توليد للطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح .

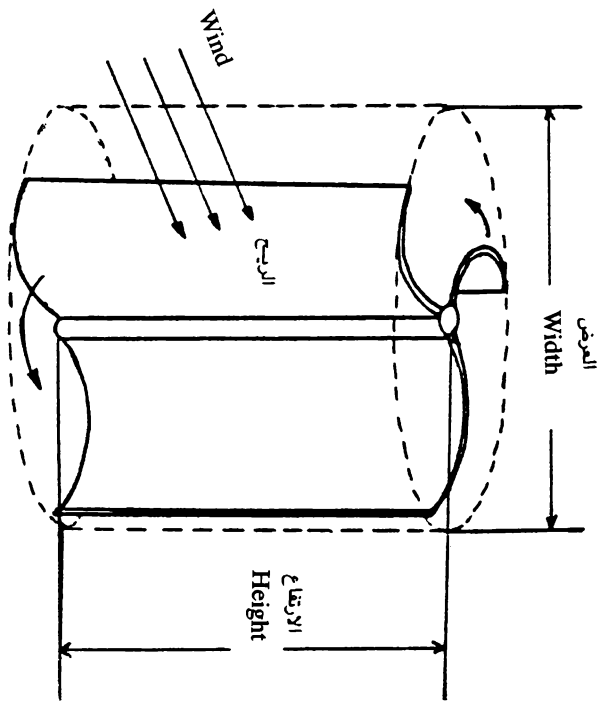
ويمكن تصنيف التوربينات الهوائية حسب معدلات القدرة المنتجة إلى ثلاثة أقسام :

- ١ — صغيرة — من صفر — ٩ كيلواط — .
- ٢ — متوسطة — من ١٠ — ٩٩ كيلواط — .

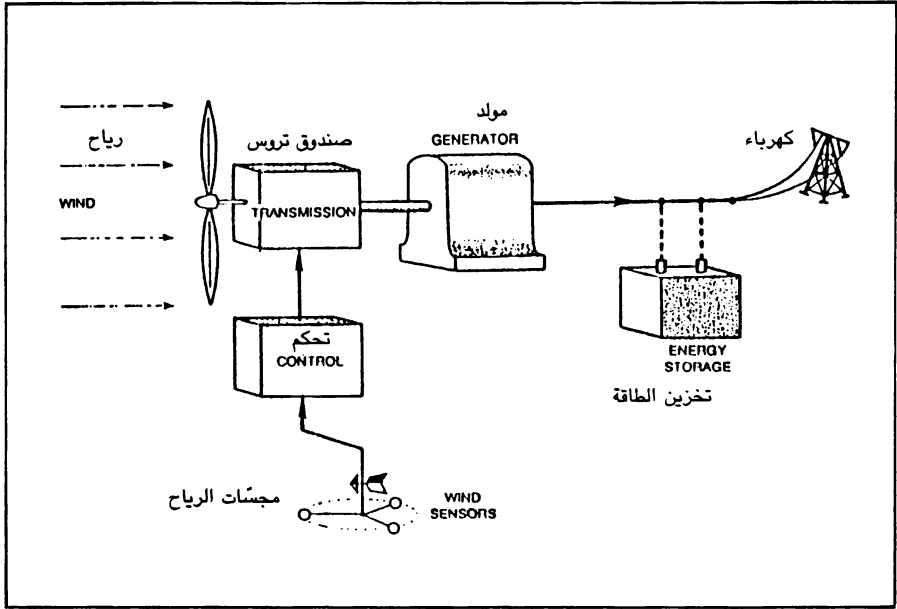
(ب) العضو الدوار الدافئ



(١) العضو الدوار ذو المحور العمودي



الشكل (٥ - ١٧)
بعض أنواع المراوح الهوائية



الشكل (٥ - ١٨)
رسم تخطيطي لنظام توليد كهربائي باستخدام طاقة الرياح

٣ - كبيرة - من ١٠٠ - ٣٠٠٠ كيلوواط - .

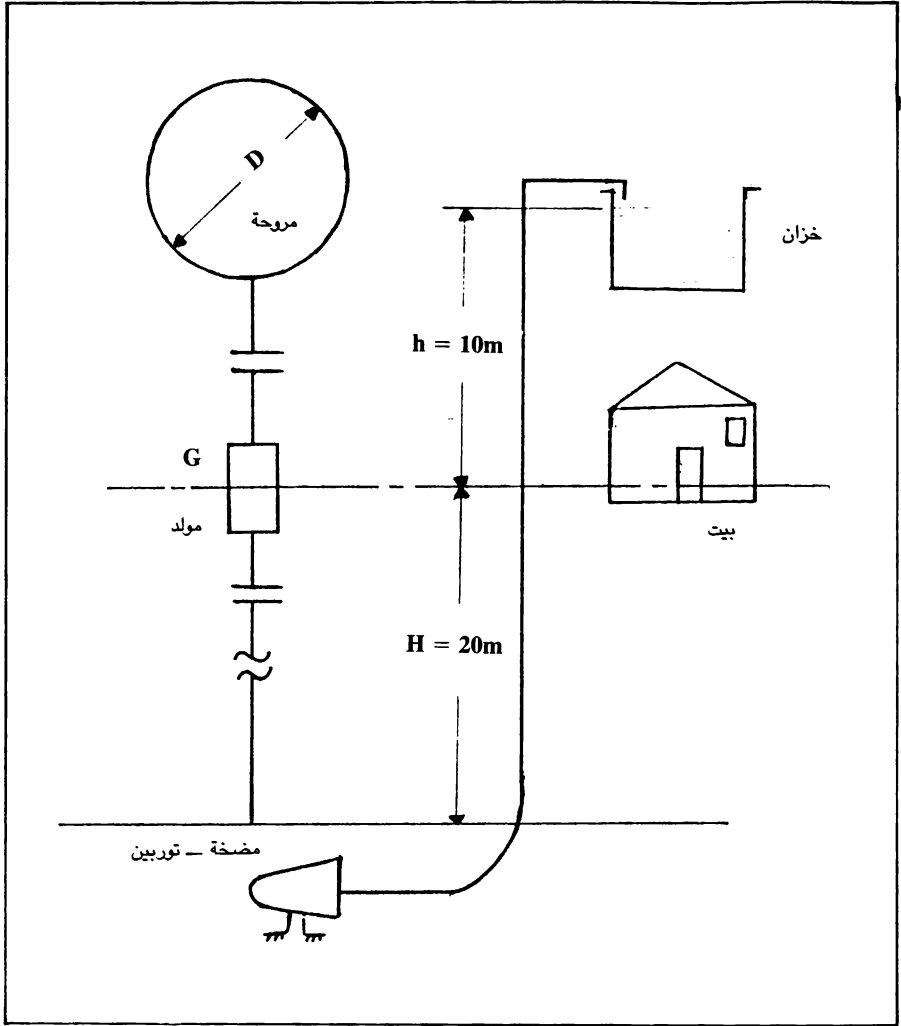
وحسب التركيب تصنف إلى :

- ١ - توربينات المحور الأفقي (Horizontal axis) .
- ٢ - توربينات المحور العمودي (Vertical axis) .

مثال :

طاحونة هوائية تستخدم لضخ المياه من عمق ٢٠ متراً باستعمال مضخة طاردة مركزية .

يخزن الماء المضخ في خزان يرتفع عشرة أمتار عن سطح الأرض وذلك لاستعماله عند توقف الرياح . ويمكن أن تعمل المضخة كتوربين - إذا عكس اتجاه التدفق للمياه - يتصل بمولد كهربائي يزود بيتاً بطاقة كهربائية مقدارها ١٢٠ كيلوواط - ساعة في اليوم . كفاءة نظام الضخ (المضخة /



التوربين والأنابيب) ٥٠ ٪ وكفاءة النظام الكهربائي (المولد والأسلاك ...)
٨٠ ٪ .

(١) احسب أبعاد خزان الماء بحيث يكون حجمه كافٍ لتشغيل المولد الكهربائي لمدة ثلاثة أيام من دون وجود رياح . افترض أن قطر الخزان مساوٍ لارتفاعه .

(ب) بافتراض أن قطر المروحة الهوائية (D) وأن معامل القدرة أكبر ما يمكن وأن سرعة الرياح تساوي ١٦ كم / ساعة. احسب قطر المروحة ، بحيث ان هذه المروحة تكون قادرة على تزويد البيت بالكهرباء وتعبئة خزان الماء (معاً) في يوم واحد .

$$\frac{120 \text{ Kw} - \text{h}}{\text{day}} \times 3 \text{ days} = 360 \text{ Kw} - \text{hr} \quad (أ)$$

$$= 1.296 \times 10^9 \text{ J}$$

$$\text{Energy} = m g H_t \text{ but } m = \rho (\text{Vol})$$

$$\text{Energy} = \rho (\text{Vol}) g (H + h) \eta_m \eta_e$$

$$\text{Vol} = \text{الحجم}$$

$$\eta_m = \text{كفاءة نظام الضخ}$$

$$\eta_e = \text{كفاءة النظام الكهربائي}$$

$$1.296 \times 10^9 = 1000 \times 9.81 \times 30 \times 0.5 \times 0.8 \times \text{Vol}$$

$$\text{Vol} = 11020.4 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) D$$

$$11020.4 = \frac{\pi D^2}{4} D$$

$$D = 24.1 \text{ m}$$

$$C_p = 16 / 27 \text{ أقصى معامل قدرة (ب)}$$

Theoretical maximum power out put

$$= \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho V^3 A \right)$$

$$= \text{Water power} + \text{Electrical power}$$

Theoretical maximum power out put

$$= \frac{P_g Q (H + h)}{\eta_m} = \frac{120 \text{ Kw} - \text{hr} \times 1000}{24 \text{ hr} \times \eta_e}$$

$$Q = \frac{\text{Vol}}{t} = \frac{11020.4 \text{ m}^3}{3 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 0.0425 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$V = 16 \text{ Km} / \text{hr} = 4.44 \text{ m} / \text{s} \text{ سرعة الرياح}$$

$$P = 1.126 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ كثافة الرياح}$$

$$\frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \times 1.126 \times (4.44)^3 \frac{\pi}{4} D^3 \right)$$

$$= \frac{1000 \times 9.8 \times 0.0425 \times 30}{0.5} + \frac{120 \times 1000}{24 \times 0.8}$$

$$D^2 = 1362.1 \text{ m}^2$$

$$D = 36.91 \text{ m}$$

● ● ●

الفصل السادس
تخزين الطاقة Energy Storage

مقدمة الفصل السادس

يمكن تخزين الأشكال الرئيسة الستة للطاقة — بشكل ما — باستثناء الطاقة الكهرومغناطيسية التي لا يمكن تخزينها بأي شكل ، فهي شكل نقي للطاقة الانتقالية .

تُعد عملية تخزين الطاقة عملية هامة وضرورية جداً — أحياناً — في الكثير من أنظمة توليد القدرة ، فأنظمة توليد القدرة من الطاقة الشمسية تتطلب إما نظاماً لتخزين الطاقة أو مصدراً بديلاً لتزويد الطاقة عندما لا يكون هناك إضاءة شمسية كافية لتوليد الطاقة .

وهناك اعتبارات عديدة يجب مراعاتها عند اختيار وتصميم وتشغيل نظام لتخزين الطاقة :

١ — الكفاءة الكلية للنظام والتي تشمل عملية الشحن (Charging) (process) وفوائد التخزين (Storage loss) وعملية استرجاع الطاقة (Recovery process) .

٢ — كثافة تخزين الطاقة وتقاس بوحدات كيلوجول / متر مكعب (KJ / m^3) أو تخزين الطاقة النوعي ويقاس بوحدات كيلوجول / كيلوغرام (KJ / kg) .

٣ — معدلات الشحن والاسترجاع (التفريغ) القصوى .

٤ — إقتصادية عملية التخزين .

٥ — المشاكل البيئية المصاحبة لعملية التخزين .

٦ — عدد مرات تشغيل — شحن واسترجاع الطاقة — نظام التخزين وعمر هذا النظام .

٦ - ٢

تخزين الطاقة الميكانيكية

٦ - ٢ - ١ تخزين طاقة الحركة : (Kinetic Energy Storage)

الطاقة الحركية هي الطاقة المصاحبة لحركة كتلة معينة بالنسبة لأخرى ، وفي حالة السرعة الخطية (Linear Velocity) فإن طاقة الحركة المصاحبة لكتلة مقدارها (m) تتحول بسرعة خطية مقدارها (V) تعطى بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} m V^2 \quad (٦ - ١)$$

حيث :

m : كتلة الجسم (kg) .

V : سرعة الجسم الخطية (m / s) .

أما في حالة الحركة الدورانية ، فإن طاقة الحركة يمكن تخزينها في عجلة التناير أو الحدّافة (Fly wheel) كالحدّافة الموجودة في السيارات والتي تخزن طاقة الحركة خلال الأشواط الفعّالة (أشواط القدرة) لاستخدام هذه الطاقة في الأشواط غير الفعّالة، وتعطى هذه الطاقة بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (٦ - ٢)$$

حيث :

I : عزم القصور الذاتي (Moment of inertia) للحدّافة

ويعطى بالمعادلة :

$$I = \int_O^R r^2 dm$$

حيث :

R : نصف قطر حافة العجل (m) .

m كتلة الحافة للعجل (kg) .

ω : السرعة الزاوية للعجلة (rad / S) .

إن تخزين طاقة الحركة في عجلة التطاير يقتضي أن تُصنع هذه العجلة من مادة ذات مقاومة (قوة) ميكانيكية عالية وذلك لتحمل الإجهادات العالية التي تتولد نتيجة لقوة الطرد المركزي المصاحبة للسرعات الدورانية العالية للعجلة .

٦ - ٢ - ٢ تخزين طاقة الوضع :

(Potential Energy Storage)

إن تخزين طاقة الوضع هو إحدى أقدم الطرق المستعملة وتشمل الزنبركات (Springs) وأنظمة الأوزان (Weight systems) والغازات المضغوطة (Compressed gases) ومعظم هذه الأنظمة ذات ساعات تخزين منخفضة وتُستخدم لتشغيل بعض أنواع الساعات الميكانيكية الكبيرة وساعات اليد والألعاب وغيرها من الأنظمة التي تتطلب ساعات تخزين قليلة وأنظمة تخزين صغيرة الحجم .

من ناحية أخرى فإن بعض أنظمة تخزين طاقة الوضع مثل الأنظمة الكهرومائية وأنظمة الغاز المضغوط التي تستخدم المضخات والضواغط تعتبر ذات ساعات تخزين هائلة .

إحدى الأنواع العامة لتخزين طاقة الوضع هو الزنبرك، وفي حالة الزنبرك الخطي (معامل المرونة ثابت) فإن الطاقة المخزنة في الزنبرك :

$$P E = \frac{1}{2} K X^2 \quad (٦ - ٣)$$

حيث :

k : ثابت المرونة للزنبرك (N / m) .

X : الاستطالة للزنبرك (m) .

أما الأنظمة التي تستخدم الكتلة لتخزين طاقة الوضع فإنها تعمل — ببساطة — على رفع كتلة معينة إلى ارتفاع معين ضد قوة الجاذبية الأرضية، وهكذا فإن طاقة الوضع المختزنة في هذه الكتلة :

$$P E = m g \Delta Z \quad (٦ - ٤)$$

حيث :

m : الكتلة (kg) .

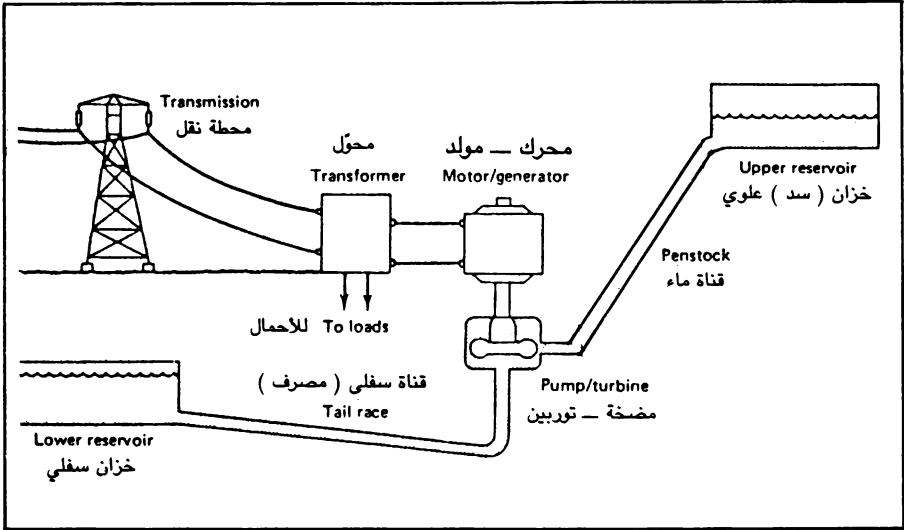
g : تسارع الجاذبية الأرضية ($g = 9.81 \text{ m / s}^2$) .

ΔZ : فرق الارتفاع (m)

لتخزين ١ كيلواط — ساعة من الطاقة على شكل طاقة وضع فإنه يلزم رفع كتلة مقدارها (1000 kg) لارتفاع مقداره (367 m) ويستعمل هذا النظام لتخزين كميات كبيرة من الطاقة وذلك بضخ كميات كبيرة من الماء إلى ارتفاع معقول يسمى بنظام تخزين الطاقة بالضخ (Pumped-Storage Energy System) . في هذا النظام يستعمل نظام توربين — مضخة إرجاعي (انعكاسي) كهرومائي (Reversible hydruelectric generator-pump) حيث يتم ضخ المياه من بحيرة أو نهر إلى خزانات ضخمة أو سدود خاصة على ارتفاعات عالية وذلك خلال فترة انخفاض الطلب على الكهرباء (الطاقة) ويعاد استعمال هذه المياه (يعمل النظام كتوربين) خلال فترة الطلب الأقصى (الذروة) على الطاقة (Peak demand) وبذلك يتم استرجاع معظم الطاقة المختزنة . الشكل (٦ - ١) يبين رسماً تخطيطياً لنظام تخزين الطاقة بضخ المياه إلى خزانات ضخمة (Reservoir) مرتفعة .

إن معظم الفواقد في نظام التخزين هذا تحدث في التوربين عند عمله كمضخة أو توربين ، وتصل كفاءته في الحالتين إلى ٩٠ ٪ مما يعني أن كفاءة الدورة الكاملة (عملية الضخ وعملية تشغيل التوربين) هي $٠,٩ \times ٠,٩ = ٠,٨١$. وهناك أيضاً فواقد الاحتكاك في الأنابيب والتي تؤدي إلى انخفاض الكفاءة الكلية للنظام لتصل إلى ٦٥ — ٧٥ ٪ .

ومن الوسائل الأخرى المستعملة لتخزين طاقة الوضع — بواسطة أنظمة



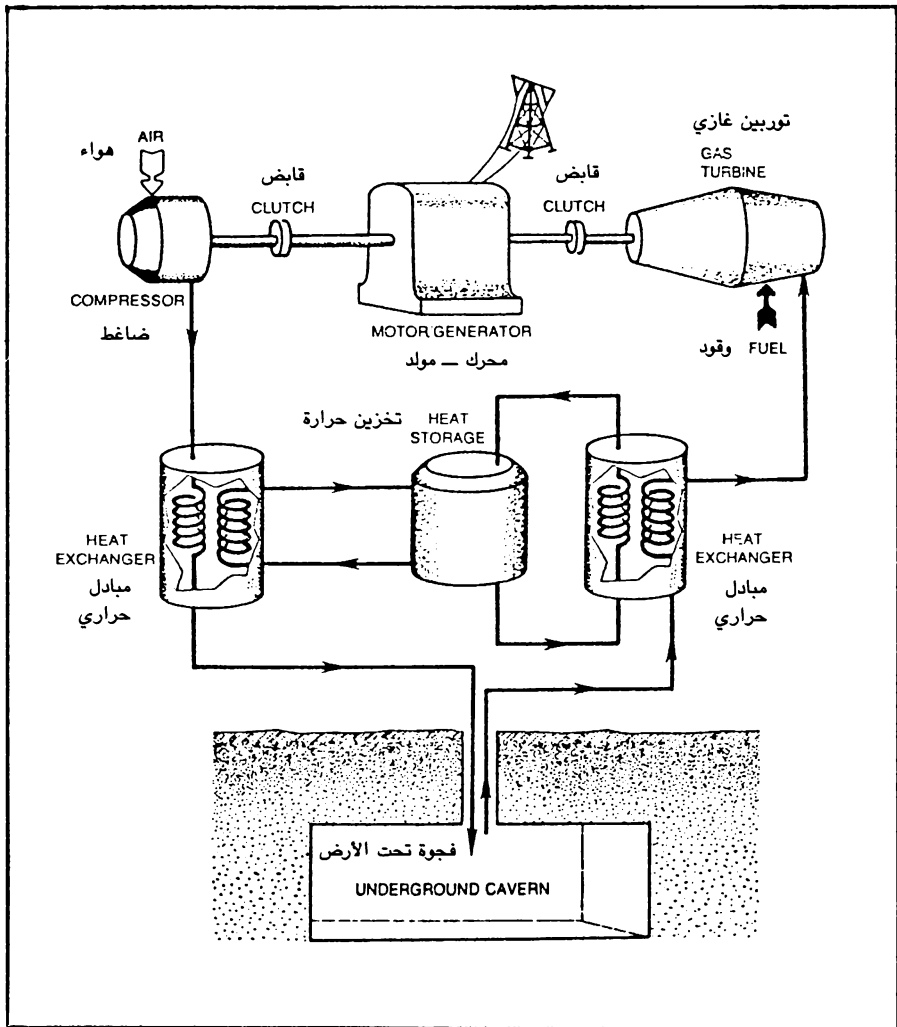
الشكل (٦ - ١)
رسم تخطيطي لنظام تخزين الطاقة بواسطة
ضخ المياه إلى سدود أو خزانات خاصة

التخزين بالضغط — (Pumped-storage systems) ، هي تخزين الطاقة عن طريق الغاز المضغوط .

وفي هذا النظام يتم ضخ الهواء المضغوط — بواسطة ضواغط — إلى فجوات ضخمة تحت الأرض كمنجم مهجور أو آبار بترول أو غاز طبيعي مهجورة أو كهف طبيعي كبير أو حفرة صناعية .

وتتم عملية الضخ للهواء خلال فترة انخفاض الطلب على الطاقة ، ثم يعاد سحب الهواء المضغوط خلال فترة الطلب الأقصى (الذروة) على الطاقة حيث يتم خلطه مع الوقود وحرقه ، ثم تؤخذ الغازات المحترقة المضغوطة إلى توربينات غازية حيث تتمدد هذه الغازات المحترقة لتنتج القدرة المطلوبة خلال فترة الحمل الأقصى أو حمل الذروة (Peak Load) للمحطة ، كما هو مبين في الشكل (٦ - ٢) .

يتناسب حجم الهواء المخزن في هذه العملية تناسباً طردياً مع كمية الطاقة المراد تخزينها وعكسياً مع ضغط الهواء المخزن ، ومن الأفضل المحافظة على



الشكل (٦ - ٢)
نظام تخزين الطاقة تحت الأرض باستخدام الغاز المضغوط

ضغط الهواء المخزن ، ثابتاً قدر الإمكان وذلك لتحقيق أقصى كفاءة ممكنة لكل من الضاغط والتوربين ويمكن عمل ذلك باستغلال ماء بحيرة أو نهر أو خزان ضخم وذلك بغمر مكان التخزين (الفجوة) بالماء ، ثم يتم بعد ذلك ضخ الهواء المضغوط إلى الفجوة لطرد المياه باتجاه معاكس عبر خط التزويد إلى مصدرها .

ويساعد الضغط الهيدروليكي المتولد من هذه العملية في المحافظة على ضغط الغاز ثابتاً إلى حد كبير عند إضافة أو سحب الهواء من الفجوة (مكان التخزين) .

تخزين الطاقة الكيميائية

في الواقع فإن الطاقة الكيميائية هي نوع مخزن من الطاقة وهي أكثر أشكال الطاقة المخزنة كثافة حيث ان قيمة تخزين الطاقة النوعي (القيمة الحرارية كيلوجول / كغم) لهذا الشكل من الطاقة هي الأعلى من بين بقية الأشكال المخزنة باستثناء الطاقة النووية .

فجميع أنواع وقود المستحاثات والتي تشكل المصدر الرئيس للطاقة في العالم في وقتنا الحاضر إنما هي طاقة كيميائية مخزنة .

تعتبر عملية تخزين الهيدروجين بشكله الذري (H) أو الجزيئي (H₂) العملية الرئيسية لتخزين الطاقة الكيميائية، ويرى بعض المختصين أن الجنس البشري سيتحول في اعتماده على الطاقة إلى الهيدروجين كمصدر رئيس للطاقة عند نفاذ الاحتياطي من وقود المستحاثات .

يعتبر الهيدروجين نوعاً ممتازاً من الوقود ، وذلك لأن ناتج احتراقه الرئيس هو الماء ويمكن أن يعاد استخلاصه من الماء مرة أخرى بطرق معينة ليعاد حرقه . تطورت الأنظمة المستخدمة في انتاج وتخزين الهيدروجين تطوراً كبيراً ، ومن الطرق المتبعة في تخزين الهيدروجين تخزينه على شكل غاز عند ضغط مرتفع أو كسائل عند درجات حرارة منخفضة ، ويمكن تخزينه كذلك في هيدرات المعادن (Metal hydrides) . الجدول (٦ - ١) يبين خصائص بعض هذه الهيدرات .

ولكون غاز الهيدروجين ذا كفاءة منخفضة فإن تخزين كمية معقولة من الطاقة لهذا الغاز تحتاج لضغطٍ عالٍ جداً أو حجم كبير .

Hydride	Hydrogen Storage by Weight (%)	Energy Density (J/g)
MgH ₂	7	9.916
MgNiH ₄	3.2	4.477
FeTiH _{1.95}	1.75	2.469
Liquid hydrogen	100	141,838
Gaseous hydrogen	100	141,838

الجدول (٦ - ١)
خصائص بعض هيدريدات المعادن

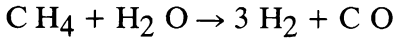
وتتطلب عملية إسالة الهيدروجين (Liquifaction) طاقة كبيرة تضيف حوالى ٣٠ ٪ إلى تكاليف إنتاج وتخزين الهيدروجين .

أما عملية تخزين الهيدروجين في هيدريدات المعادن ، فإنها تكون على حساب فواقد حرارية وأوزان كبيرة بالإضافة إلى مشكلة تلوثه وإفساده (Contamination) أو إفساد الهيدريدات بواسطة الأكسجين أو الماء أو كليهما مما يؤدي إلى انخفاض السعة التخزينية للهيدروجين بشكل كبير .

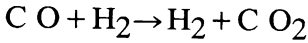
ويمكن إنتاج الهيدروجين من عدة تفاعلات كيميائية من أشهرها التحليل الكهربائي للماء (Electrolysis) حيث يمرر تيار مباشر خلال محلول سائل موصل (ايوني) مما يؤدي إلى إنتاج الهيدروجين على أحد الأقطاب والاكسجين على القطب الآخر، وتصل كفاءة هذه العملية الفعلية إلى ٨٥ ٪ ولكن لكون الكهرباء هي العامل المستعمل في التحليل والتي هي أصلاً محولة عن طاقة ميكانيكية التي هي بدورها محولة عن طاقة حرارية فإن الكفاءة الكلية الفعلية لإنتاج الهيدروجين تنخفض إلى ٣٥ ٪ .

وحيث انه بالإمكان تحضيره بسهولة أكبر من وقود المستحاثات وبكفاءة تحويلية أعلى فإن طريقة التحليل الكهربائي للماء تستعمل فقط عندما يكون الغرض هو الحصول على هيدروجين نقياً جداً .

معظم الهيدروجين المنتج في الوقت الحاضر يحضر من الميثان في عملية إعادة تشكيل البخار (Steam reforming process) والتي تجري عند درجة حرارة ٩٠٠°س. ويستخدم هذا النظام غاز الميثان لإنتاج الهيدروجين حسب التفاعل :



وهذا التفاعل هو تفاعل ماص للحرارة (Endothermic) ويتطلب حرارة مقدارها حوالى (30 KJ / K mol of C H₄) ، أما أول أكسيد الكربون المنتج في هذا التفاعل فإنه يستعمل لإنتاج المزيد من الهيدروجين حسب التفاعل — يتم عند درجة حرارة ٤٠٠ °س — .



وهناك بحوث متعددة لإنتاج الهيدروجين بطرق أخرى مختلفة .

٦ - ٤

تخزين الطاقة الكهربائية

يعتبر المرمك أحد أجهزة تخزين الطاقة الكهربائية حيث انه يخزن الطاقة الكهربائية على شكل طاقة كيميائية ، فعند شحن المرمك تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة كيميائية في تفاعل كيميائي ماص للحرارة ، وعند تفريغه فإن المتفاعلات تتحد بعضها مع بعض في تفاعل طارد للحرارة ينتج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر .

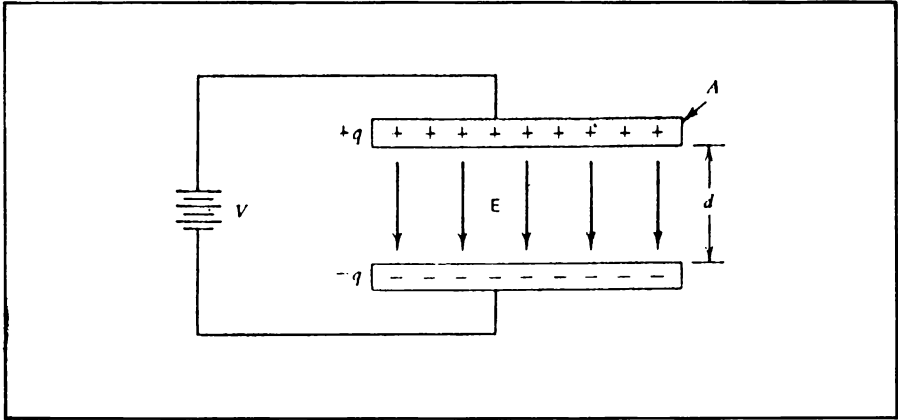
يتم تخزين الطاقة الكهربائية ككهرباء في مجالات كهربائية ساكنة (Electrostatic fields) أو مجالات طاقة حثية (Inductive energy fields) .

١ - تخزين الطاقة الكهربائية في مجال كهروساكن :

إذا وصلت صفيحتان متوازيتان موصلتان مساحة كل منهما (A) والمسافة بينهما مفرغة Vacuum (d) بمرمك له قوة دافعة كهربائية (V) كما هو مبين في الشكل (٦ - ٣) فإن الشحنات الكهربائية ستتوزع بحيث ان كل صفيحة تحمل شحنة كهربائية مساوية لشحنة الصفيحة الأخرى بالمقدار ومخالفة لها بالإشارة . ويكون فرق الجهد النهائي (V) بين الصفيحتين مساوياً للقوة الدافعة الكهربائية للمرمك (e m f) ويتولد مجال كهربائي منتظم (E F) — بإهمال تأثيرات الحوافي للصفيحتين — بينهما .

وبما أن هناك شغلاً يبذل لإعادة توزيع الشحنات بشكلها النهائي فإن هذا يعني إن المجال الكهربائي في الفراغ بين الصفيحتين يعمل كخازن للطاقة .

يُسمى الجهاز المبين في الشكل (٦ - ٣) بالمكثف (Capacitor) الكهربائي، كما يطلق على النسبة بين الشحنة الكهربائية (q) إلى فرق الجهد



الشكل (٦ - ٣)
مكثف كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين

(V) اسم السعة الكهربائية (Capacitance) وتقاس هذه السعة بوحدة الفاراد (Farad) .

الطاقة الكهربائية المخزنة في المكثف :

$$E_c = \frac{1}{2} C V^2 \quad (٦ - ٥)$$

حيث :

C : السعة الكهربائية بالفاراد

V : فرق الجهد النهائي بين صفيحتي المكثف بالفولت

في حالة مكثف الصفيحتين المتوازيتين فإن السعة الكهربائية :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (٦ - ٦)$$

حيث :

ϵ_0 : سماحية (Permittivity) الفراغ

$$(\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{Farad}}{\text{m}})$$

وتعطى شدة المجال الكهربائي (E F) بين صفيحتي المكثف .

بالمعادلة :

$$E F = \frac{V}{d} = \frac{q}{C d} \quad (٧ - ٦)$$

وبالاستعانة بالمعادلة (٦ - ٦) فإن :

$$E F = \frac{q}{\epsilon_0 A} \quad (٨ - ٦)$$

وإذا ملئ الفراغ بين الصفيحتين بمادة عازلة فإن سماحية الفراغ (ϵ_0) تستبدل بسماحية تلك المادة (ϵ) .

من خصائص المكثف الكهربائي ، أنه يبقى محتفظاً بالشحنات الكهربائية لفترة من الزمن بعد فصله عن مصدر الجهد الكهربائي إذا كان هذا المكثف معزولاً بشكل جيد .

تعتمد كمية الطاقة التي يخترنها المكثف الكهربائي على حجمه ونوعية المادة العازلة المستخدمة والتي تصنف حسب النسبة بين سماحيتهما إلى سماحية الفراغ (ϵ / ϵ_0) وتسمى هذه النسبة بثابت العازلية (K) (Dielectric Constant) .
الجدول (٦ - ٢) يبين ثابت العازلية (K) وشدة العازلية (Dielectric strength) لبعض المواد .

مثال :

ما هي مساحة مكثف كهربائي ذي صفيحتين متوازيتين يفصل بينهما مسافة مقدارها ٥ مم ووسط عازل مصنوع من الورق (Paper) إذا كان هذا المكثف يخترن طاقة مقدارها ٣,٦ × ٣١٠ كيلوجول .

من الجدول (٦ - ٢) فإن أقصى انحدار للمجال الكهربائي (Electric field gradient) هو 14 K V / m

ولهذا فإن أقصى فرق جهد :

$$V_{\max} = 14 \frac{K V}{m} \times 5 m = 70 K V$$

Insulator	ϵ / ϵ_0 Dielectric Constant	Dielectric Strength (kV/mm)
Vacuum	1.00000	∞
Air	1.00054	0.8
Nylon	3.5	59
Paper	3.5	14
Pyrex glass	4.5	13
Polyethylene	2.3	50
Teflon	2.1	60
Titanium dioxide	100	6

الجدول (٦ - ٢)
ثابت العازلية وشدة العازلية لبعض المواد

$$E_c = \frac{C V^2}{2}$$

$$3.6 \times 10^6 = \frac{C (70 \times 10^3)^2}{2}$$

$$C = 0.001469 \text{ farad}$$

من الجدول (٦ - ٢) فإن ثابت العازلية لمادة الورق
بإعادة كتابة المعادلة (٦ - ٦) على النحو :

$$C = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) A}{d}$$

$$0.001469 = \frac{8.85 \times 10^{-12} (3.5) A}{0.005}$$

مساحة لوح المكثف :

$$A = 2.371 \times 10^5 \text{ m}^2$$

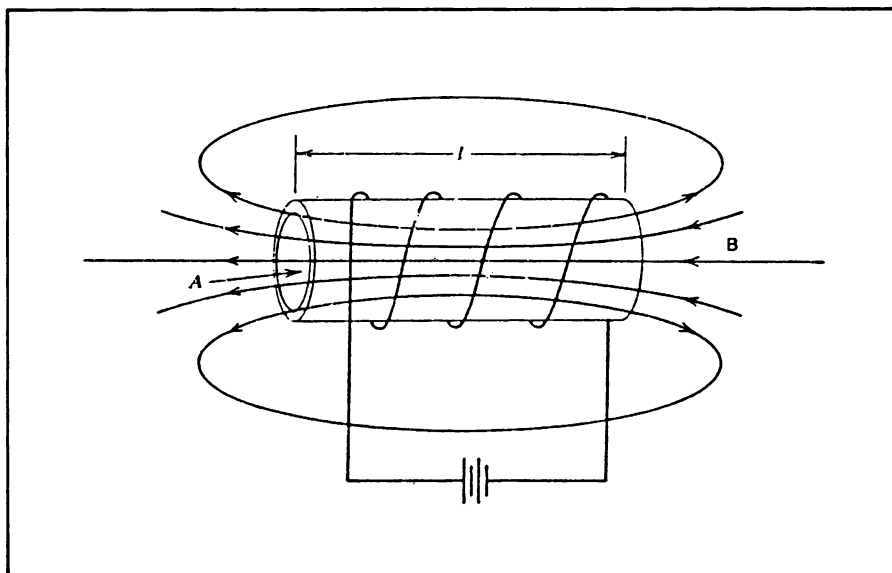
وهذا يعني أنه لو كان لوح المكثف مربع الشكل فإن طول ضلعه L هو :

$$L = \sqrt{2.371 \times 10^5}$$

$$= 486.93 \text{ m}$$

٢ - تخزين الطاقة الكهربائية في مجال حثي :

إذا وصل ملف لولبي ذو قلب (مركز) هوائي (Air core coil or solenoid) بمركم كما هو مبين في الشكل (٦ - ٨) فإنه بعد فترة من الزمن يحصل ما يلي :



الشكل (٦ - ٨)

ملف لولبي (طول اللفات l ومساحة المقطع A)

١ - يتولد تيار ثابت (I) في الدائرة .

٢ - يتولد مجال مغناطيسي ثابت في وحول الملف اللولبي .

لتوليد المجال المغناطيسي المذكور فإنه يلزم شغل (طاقة) وذلك بسبب تولد قوة دافعة كهربائية معاكسة للتيار في البداية ، وتعتمد هذه القوة الدافعة

الكهربائية (e m f) على معدل تغير التيار الذي يعتمد بدوره على الخصائص الفيزيائية للفات الملف (Windings) .

ولقد أثبتت التجارب العملية أن نسبة القوة الدافعة الكهربائية (e m f) المعاكسة إلى معدل التغير في التيار ثابتة لتركيبية معينة من اللفات وتسمى هذه النسبة بالمحثة (Inductance L) وتقاس بوحدة الهنري (Henry H) .

$$L = \frac{|e m f|}{di / dt} \quad (٩ - ٦)$$

الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي :

$$E_i = \frac{1}{2} L I^2 \quad (١٠ - ٦)$$

حيث :

L : المحثة بالهنري (H)

I : التيار النهائي الثابت بالأمبير

وللملف اللولبي فإن :

$$L = \mu_0 n^2 \ell A \quad (١١ - ٦)$$

حيث :

n : عدد اللفات

μ_0 : النفاذية (Permeability) للفراغ

($\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H / m}$)

ℓ : طول اللفات .

أما العلاقة بين التيار والمجال المغناطيسي B فهي :

$$B = \mu_0 i n \quad (١٢ - ٦)$$

الفرق الرئيس بين المكثف والمحث أنه في حالة المكثف ، فإن الطاقة المخزنة (شحنة المكثف) تبقى لفترة من الزمن بعد فصل المكثف عن مصدر الجهد الكهربائي ، في حين أن الطاقة المخزنة في حالة المحث تستعاد بكاملها

(تغذى للدائرة الكهربائية) عند فتح الدائرة ، حيث يتلاشى المجال المغناطيسي مباشرة .

مثال :

ما هو مقدار الطاقة المختزنة في ملف لولبي عدد لفاته ٥٠ ويمر به تيار مقداره ١٠ أمبير إذا كان طول هذا الملف ١٠ سم ومساحة مقطعه ٢ سم^٢ .

$$L = \mu_0 n^2 \ell A$$

$$L = 1.26 \times 10^{-12} \times (50)^2 \times 0.1 \times 2 \times 10^{-4}$$

$$L = 6.3 \times 10^{-8} \text{ H}$$

$$E_i = \frac{1}{2} L I^2$$

$$E_i = \frac{1}{2} \times 6.38 \times 10^{-8} \times (10)^2 = 3.15 \times 10^{-6} \text{ J}$$

تخزين الطاقة الحرارية

يستخدم نظام تخزين الطاقة الحرارية ثلاثة أشكال للطاقة الحرارية . وهي الطاقة الحرارية المحسوسة (Sensible-heat) والطاقة الحرارية الكامنة (Latent-heat) والحرارة شبه الكامنة (Quasi-Latent heat) وهذا النوع الأخير ليس شكلاً نقياً للطاقة الحرارية إذ انه يتضمن بعض التفاعلات الكيميائية .

في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة ، يتم تخزين الحرارة برفع درجة حرارة المادة الصلبة أو السائلة. فإذا كانت الحرارة النوعية ثابتة فإن الطاقة الحرارية المخزنة في النظام تتناسب خطياً مع الارتفاع في درجة الحرارة للمادة .

والمشكلة الرئيسية التي تواجه استخدام نظام تخزين الحرارة المحسوسة عند درجات حرارة مرتفعة هي ارتفاع تكاليف جهاز التخزين، الذي يكون عادة عبارة عن حاوية فولاذية مضغوطة أو فجوة ضخمة تحت الأرض .

تُخزن الطاقة الحرارية الكامنة عند ثبات درجة الحرارة، حيث تتغير حالة (طور) المادة ويكون هذا التغير عادة من حالة الصلابة إلى الحالة السائلة، ويصاحب التغير اكتساب (شحن) أو فقدان (تفريغ) كميات كبيرة من الطاقة الحرارية . وتمتاز أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة بأن لها كثافة تخزين أعلى بكثير من تلك التي لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة، وذلك لكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة (Latent heat of phase change) مرتفعة للمادة المستخدمة في نظام التخزين ، وعلى سبيل المثال فإن الحرارة الكامنة لانصهار الماء (الثلج) تساوي ٣٣٤٩٠٠ جول / كغم والحرارة الكامنة لتبخره تساوي ٢٢٦٠٠٠٠ جول / كغم ، وتكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة دائماً أعلى من

السعة الحرارية للمادة مما يجعل نظام تخزين الحرارة الكامنة أكثر فعالية من نظام تخزين الحرارة المحسوسة .

هناك مجموعة من المواد يطلق عليها اسم الهيدرات (Hydrates) تمتاز بارتفاع الحرارة الكامنة لتغير حالتها بالإضافة إلى انخفاض درجات حرارة انصهارها ، وبعض هذه المواد مبين في الجدول (٦ - ٣) .

في أنظمة تخزين الحرارة شبه الكامنة فإن الطاقة الحرارية يتم تحويلها إلى طاقة كيميائية في تفاعل إرجاعي ماص (Reversible endothermic) للحرارة يحدث عند درجة حرارة ثابتة. أما العملية العكسية فتتم بتغيير تركيز أو ضغط المتفاعلات أو بتغيير درجة الحرارة فقط أو بتغيير درجة الحرارة مع الضغط والتركيز . وفي حالة تغيير درجة حرارة المتفاعلات فقط فإن النظام يعمل كنظام تخزين للطاقة الحرارية المحسوسة .

وتتراوح أنظمة تخزين الطاقة الحرارية من الأنظمة البسيطة التي تستخدم الماء أو الهواء الذي يضخ عبر نظام التخزين، إلى الأنظمة المعقدة التي تستخدم فيها التفاعلات الكيميائية الماصة للحرارة على درجة حرارة ثابتة لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كيميائية .

هناك عاملان هامين يؤثران في تصميم نظام تخزين الطاقة الحرارية هما :

١ - معدل فقدان الحرارة الذي يعتمد على المساحة السطحية لنظام التخزين وفعالية العازل الحراري المستخدم حول النظام .

Hydrate	Melting Point (°C)	Heat of Fusion (kJ/kg)	Specific Heat		Density (g/cm ³)
			Solid (kJ/kg °C)	Liquid (kJ/kg °C)	
Al ₂ (SO ₄) ₃ ·12H ₂ O	88	260	0.46	1.03	1.65
Na ₂ C ₂ O ₄ ·3H ₂ O	58	264	0.60	1.00	1.30
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	306	0.58	0.94	1.44
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	18	186	0.54	1.00	1.51
1(Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O) + 1.5(NH ₄ Cl)	11	162	0.41	0.77	1.48

الجدول (٦ - ٣)
خصائص بعض الهيدرات

٢ — كثافة الطاقة المخزنة. وهي الطاقة المخزنة لكل وحدة حجم وتقاس بوحدات جول / متر مكعب .

وبشكل عام فإن نظام تخزين الطاقة الحرارية ذو السعة الكبيرة يمتاز بأن نسبه (المساحة السطحية / الحجم) له تكون أقل ما يمكن .

ويمكن تقسيم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية إلى :

١ — أنظمة ذات درجات حرارة منخفضة تعمل تحت درجة حرارة ١٥٠ س° وتخزن فيها الطاقة الحرارية المحسوسة في الماء أو الصخور أو الطاقة الحرارية الكامنة في الثلج أو بعض أنواع الأملاح مثل ملح جلوبير (Glauber's salt) ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) أو الشمع البرافيني أو الأحماض الدهنية. وتستعمل هذه الأنظمة أحياناً لتزويد البيوت بالحرارة في الشتاء للتدفئة .

٢ — الأنظمة ذات درجات الحرارة المتوسطة والعالية. تستعمل هذه الأنظمة بكثرة في تدفئة البيوت والصناعة ويتم فيها خزن الحرارة بتسخين الصخور أو الطوب أو الحديد أو السيراميك .

إن هذه الأنظمة تعتبر ذات تكاليف عالية بالإضافة إلى صعوبات تشغيلها ولذلك فهي لا تحظى بالاهتمام الكثير .

مثال :

ما هو حجم الحاوية اللازم لتخزين ٦٥ ميغاواط — ساعة من الطاقة الحرارية المحسوسة في بخار الماء المشبع عند درجة حرارة ٢٠٠ س° إذا كانت قيمة الانتالبي للبخر عند هذه الدرجة هي ٢٧٩,٣ كيلوجول / كغم وحجمه النوعي هو ١,٢٧ م^٣ / كغم .

كمية البخار اللازمة :

$$\begin{aligned} \text{Quantity of steam} &= \frac{65 \times 10^6 \times 60 \times 60}{279.3 \times 10^3} \\ &= 8.3781 \times 10^5 \text{ kg} \end{aligned}$$

الحجم اللازم :

$$V = \frac{0.127 \times 3.61 \times 65 \times 10^9}{279.3 \times 10^3}$$
$$= 1.064 \times 10^5 \text{ m}^3$$

وهذا الحجم يكافئ حجم خزان اسطواني قطرة ٦٠ متراً وارتفاعه ٤٠ متراً ، وإذا أخذت الفواقد بعين الاعتبار فإن هذا يعني أن الحجم المطلوب يكون أكبر من الحجم المحسوب .

مثال :

احسب مقدار الطاقة المخزنة لكل وحدة كتلة في حجم من $\text{Na}_2 \text{SO}_4 10\text{H}_2 \text{O}$ مقداره ٣ م^٣ إذا كان مدى تغير درجة الحرارة هو من ١٥° — ٥٠° س .

$$Q = C_{\text{solid}} m (T_{\text{fusion}} - T_{\text{low}}) + L_{\text{fusion}} m$$
$$+ C_{\text{liquid}} m (T_{\text{high}} - T_{\text{fusion}})$$

$$m = \rho V = 1.51 \times 3 \times (10^2)^3 = 4.53 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$Q = [0.54 \times (18 - 15) + 186 + 1.0 \times (50 - 18)]$$
$$\times 10^3 \times (4.53 \times 10^3)$$

$$Q = 994.9 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\frac{Q}{m} = 219.6 \times 10^3 \text{ J / kg}$$

● ● ●

الفصل السابع
ترشيد استهلاك الطاقة

فوائد وأهمية ترشيد استهلاك الطاقة

هناك فوائد عديدة يمكن أن نجنيها من برامج ترشيد استهلاك الطاقة يمكن تلخيصها بأربعة فوائد هامة :

١ - حفظ وترشيد مصدر هام وقيم: تشير الدراسات والبحوث - وكذلك الإجراءات العملية التي اتخذت في عدد من البلدان - إلى أنه بالإمكان توفير كميات كبيرة من الطاقة بتطبيق برامج ترشيد الاستهلاك دون التأثير على مستوى المعيشة لأفراد المجتمع .

٢ - كسب المزيد من الوقت وإتاحة الفرصة لتطوير مصادر بديلة للطاقة: تشير دراسات الخبراء إلى أن الإنسان بحاجة إلى فترة زمنية تتراوح ما بين ١٠ - ٢٥ سنة لتطوير مصادر بديلة وفعالة للطاقة خصوصاً في مجال الانشطار النووي، ولا شك بأن ترشيد استهلاك وقود المستحاثات (الفحم والبتروال والغاز) التي هي المصادر الرئيسة للطاقة في الوقت الحاضر يعطى المزيد من الوقت لتطوير تلك المصادر البديلة .

٣ - تقليل تلوث البيئة: كما رأينا سابقاً فإن واحدة من المشاكل الرئيسة التي تواجه المصادر البديلة والمصادر الحالية للطاقة على السواء هي مشكلة التلوث حيث ان المصدر الوحيد الخالي من التلوث تقريباً هو الطاقة الشمسية، ولا شك بأن استغلال هذا المصدر والتقليل من استعمال المصادر الأخرى يساهم في التقليل من حجم مشكلة التلوث .

٤ - التقليل من اعتماد البلدان المستوردة للطاقة على وارداتها من الدول الأخرى

المصدرة لها، فترشيد استهلاك الطاقة يساهم في توفير مبالغ طائلة تدفعها الدول المستوردة للطاقة ثمناً لمستوردياتها .

هناك طريقتان أساسيتان يمكن اتباعهما لحفظ وترشيد استهلاك الطاقة ، وهما :

١ — اتباع سياسة (شد الحزام) وذلك بالاستغناء عن بعض المتطلبات غير الضرورية .

٢ — استعمال الطاقة بفعالية أكبر (تقليل الفواقد) مع المحافظة على نفس المعدل من الاستهلاك مع وجود القناعة بهذا الاستهلاك .

حفظ الطاقة وتأثير العامل الشخصي

يعتمد نجاح أي مشروع أو برنامج لحفظ الطاقة على تعاون أفراد المجتمع في هذا المجال والذين هم الهدف الأول والأخير لمثل هذا البرنامج .

من دراستنا السابقة عرفنا أن أحد العوامل الرئيسية التي تزيد من استهلاك الطاقة هي زيادة معدل استهلاك الفرد من الطاقة . وهناك عامل آخر يرتبط بهذا العامل وهو الزيادة في الخسائر (الفواقد) في عمليات تحويل الطاقة .

مما لا شك فيه أن الزيادة في معدل استهلاك الفرد من الطاقة يعود بشكل أساسي إلى التغير المستمر في أسلوب ومستوى معيشة الأفراد حيث ان التحول من اعتماد الإنسان على عضلاته إلى الاعتماد على الآلات في ازدياد مستمر .

ولعل التحول إلى استعمال الطاقة الكهربائية والاعتماد عليها في مختلف المتطلبات داخل المنزل يتسبب في زيادة ملحوظة في استهلاك العائلة من هذه الطاقة . والسؤال الذي يطرح نفسه كيف يمكن الحد من تزايد استهلاك الطاقة على المستوى الفردي ؟

المقترحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة على المستوى الفردي :

١ — زيادة أسعار الاستهلاك الفائض من الطاقة — الكهربائية خصوصاً — أو فرض ضرائب على هذه الزيادة .

٢ — تحديد عدد السيارات التي تقتنيها العائلة .

٣ — تحديد عدد الأطفال في الأسرة (تنظيم النسل) .

- ٤ — منع استعمال الإضاءة الزائدة وإطفاء الغرف والأماكن الشاغرة .
- ٥ — استعمال المواصلات العامة ما أمكن ذلك .
- ٦ — عدم استعمال السيارات للمسافات القصيرة التي يمكن الوصول إليها على الأرجل .
- ٧ — التقليل من عدد الرحلات الترفيهية وتقصير مسافتها .
- ولا شك بأن هناك فرصاً أخرى عديدة يمكن للأفراد من خلالها ترشيد استهلاك الطاقة ليس هناك مجال لحصرها جميعاً .

٧ - ٣

الطلب على الطاقة والتزود بها في المستقبل

للمساعدة في الحصول على صورة واضحة لأهمية حفظ الطاقة فإن ذلك يتم بدراسة متطلبات أو احتياجات الطاقة وطرق التزود بها في المستقبل .

ويمكن دراسة متطلبات الطاقة في المستقبل باستخدام معدلات النمو المتوقعة في الاستهلاك كما مر سابقاً .

إن التقديرات لمصادر الطاقة الرئيسة في المستقبل تشير إلى أن وقود المستحاثات ستبقى هي المصدر الأساسي للطاقة وستلعب الدور الرئيس في المستقبل المنظور .

فالنسب المئوية للطاقة المولدة من المحطات للكهربائية والفحم الحجري والنفط من المتوقع أن تبقى ثابتة حتى منتصف التسعينات .

ومن المتوقع أن تقل نسبة الطاقة المولدة من الغاز الطبيعي خلال هذه الفترة وتزداد أهمية الطاقة النووية التي ينتظر أن تلعب دوراً رئيساً كمصدر للطاقة في المستقبل .

إن اتباع سياسة حفظ الطاقة وترشيد استهلاكها يمكن لها أن توفر نسباً من الطاقة في المستقبل ، ففي الولايات المتحدة — مثلاً — تشير الدراسات إلى أن اتباع إجراءات حفظ الطاقة على المدى القصير (١ - ٣ سنوات) والمدى المتوسط (٤ - ٨ سنوات) والمدى الطويل (أكثر من ٨ سنوات) ستوفر حوالى ٢٤ ٪ من استهلاك الطاقة عام ١٩٩٠ م .

٧ - ٤

ترشيد استهلاك الطاقة في قطاعات الاستهلاك المختلفة

٧ - ٤ - ١ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاعين المنزلي والتجاري :

١ - أنظمة البناء :

- (أ) اختيار النوافذ بحيث تواجه الأشعة الشمسية لتوفير الإضاءة والحرارة خصوصاً في الشتاء .
- (ب) العزل الحراري كعزل الشبابيك والأبواب وأنابيب التدفئة والتبريد ... وعزل الأرضيات والجدران والسقوف .

٢ - العناية بأنظمة التكييف والتدفئة :

- (أ) عزل أنابيب التدفئة .
- (ب) اقتناء منظم لدرجة الحرارة (Thermostat) وضبطه عند قيم محددة (في الليل يقترح ١٥°س وفي النهار ١٨°س) .
- (ج) صيانة نظام التدفئة بشكل دوري (مرة واحدة سنوياً) .
- (د) التأكد من جودة وفعالية فتيل المدفأة للحصول على احتراق كامل .

٣ - العناية بأنظمة تسخين المياه :

- (أ) اقتناء أنظمة تسخين مياه شمسية .
- (ب) اقتناء أنظمة تسخين معزولة حرارياً بشكل جيد .
- (ج) عدم تسخين المياه لأكثر من ٥٠°س لمختلف الاستعمالات المنزلية .

٤ - العناية بأنظمة التبريد :

- (أ) التأكد من ضبط درجة الحرارة عند قيمة معينة بواسطة المنظم .
- (ب) عزل مجاري الهواء .
- (ج) اقتناء وحدات تبريد صغيرة إذا كان المقصود تكييف أماكن جزئية فقط .
- (د) ضبط سرعة المروحة على السرعة القصوى إلا في الأيام الرطبة .
- (هـ) تنظيف مرشح الهواء .
- (و) استخدام مراوح إضافية في التبريد لنشر الهواء بشكل أفضل في الحيز المكيف .

٥ - أنظمة الإنارة :

- (أ) إطفاء أنوار الغرف والأماكن الشاغرة .
- (ب) استخدام مصابيح ذات قدرات عالية بدلاً من مجموعة مصابيح ذات قدرات منخفضة .
- (ج) استخدام مفاتيح إنارة ذات مستويات مختلفة من الشدة .
- (د) المحافظة على نظافة المصابيح السطحية .
- (هـ) استخدام مصابيح الفلورسنت لأنها ذات شدة إضاءة أعلى واستهلاك أقل .

٦ - أسس اقتناء السيارات :

- (أ) شراء السيارات خفيفة الوزن الاقتصادية في استهلاك الوقود .
- (ب) عدم المبالغة في استخدام أنظمة التكييف والتبريد في السيارة .
- (ج) صيانة محرك السيارة بشكل دوري .
- (د) المحافظة على ضغط الهواء في عجلات السيارة عند حد معين لأن انخفاض الضغط يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود .
- (هـ) استخدام إطارات شعاعية لتوفير طاقة تصل إلى ٥ ٪ .

(و) التخلص من الأوزان الزائدة في السيارة .

٧ — أنظمة تبريد الطعام والطهي :

- (أ) عدم المبالغة في فتح أبواب الثلاجات في المنازل والمتاجر .
 - (ب) حفظ الطعام عند حرارة 3°C — 5°C ونظام التجميد عند 18°C .
 - (ج) إزالة الصقيع عن جدران المجمد بانتظام .
 - (د) الالتزام بإشارات كتب الطهي بخصوص فترة نضج الطعام .
 - (هـ) استخدام أدوات مطبخ نظيفة من الأسفل (خالية من طبقة الكربون) .
 - (و) المحافظة على الطباخات نظيفة والمحافظة على اللهب الأزرق لهذه الطباخات .
- وهناك أيضاً نقاط إرشادية أخرى عديدة تتعلق باستخدام أنظمة الغسيل والخيطة وغيرها من أنظمة استهلاك الطاقة في المنازل والمتاجر .

٧ - ٤ - ٢ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي :

يستهلك هذا القطاع نسبةً عالية من مجموع الطاقة المستهلكة، ولا شك بأن ترشيد استهلاك الطاقة واستخدامها بالطرق الفعالة والمناسبة في هذا القطاع يؤدي إلى تخفيض تكاليف الانتاج وتوفير مبالغ طائلة على الدولة والمؤسسات الخاصة والأفراد .

يحتاج ترشيد استهلاك الطاقة في هذا القطاع إلى دراسة شاملة ودقيقة لحفظ الطاقة، تأخذ بعين الاعتبار عوامل هامة ورئيسة كتصميم المصنع وأنماط التشغيل وصيانة الأجهزة والمعدات وتوافر أجهزة التحكم والكوادر الفنية المدربة في مجال حفظ الطاقة في المصنع والجدوى الاقتصادية لاستغلال مثل هذه الفرص .

يمكن تقسيم طرق حفظ الطاقة في الصناعة إلى قسمين رئيسين :

- ١ — تنظيم تشغيل وصيانة الأجهزة والمعدات : ومن أهم الأمثلة على ذلك العزل الحراري لأنابيب البخار والماء الساخن وصيانة نقاط تسرب

الهواء في نظام انضغاط الهواء وتسرب البخار من الصمامات والوصلات ،

وقياس استهلاك البخار والتحكم الأتوماتيكي بدرجات الحرارة للبخار وكذلك يجب دراسة ومتابعة كفاءة مختلف الأجهزة والعمليات والأنظمة في المصنع .

٢ — استغلال الطاقة الضائعة : وهي الطاقة الحرارية الخارجة من نظام معين بدرجة حرارة مرتفعة وأعلى بكثير من درجة حرارة الجو مثل الحرارة الضائعة من الغازات العادمة والمواد الساخنة المنتجة في المصنع خصوصاً السوائل. ويمكن استغلال الحرارة الضائعة في السوائل والغازات ذات درجات الحرارة العالية وذلك بتركيب مبادلات حرارية (Heat-Exchanger) ومضخات حرارية (Heat pumps) .

ومن الأمثلة على ذلك استغلال حرارة الغازات العادمة الخارجة من المراحل البخارية لتسخين مياه التغذية بواسطة مبادلات حرارية فعالة .

ويمكن للحكومة أن تتخذ بعض الإجراءات لتنظيم استهلاك الطاقة في هذا القطاع ، من أهمها

- ١ — زيادة أسعار الطاقة المستهلكة بشكل زائد أو فائض .
- ٢ — فرض غرامات على استهلاك الطاقة الكهربائية من قبل هذه المصانع في فترات الذروة أو الحمل الأقصى (Peak-load)
- ٣ — منع استعمال مصادر الطاقة ذات التكاليف المرتفعة لإنتاج الكهرباء كالغاز الطبيعي مثلاً .
- ٤ — منع أي توسع صناعي غير ضروري .
- ٥ — تشجيع استعمال المواد البديلة التي يتطلب إنتاجها طاقة وتكلفة أقل مثل العبوات المصنوعة من بعض أنواع الحديد بدلاً من الألمنيوم .
- ٦ — منع استعمال بعض المنتجات التي يتم التخلص منها بعد استهلاك محتوياتها مثل بعض زجاجات المشروبات التي يتم التخلص منها بعد استهلاك المشروبات ولا تعاد تعبئتها .
- ٧ — تشجيع المنتجات ذات الجودة الأعلى والعمر الأفضل .

٨ — تشجيع إعادة بعض المواد المستهلكة مثل حديد السيارات التالفة .

في الأردن نما استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي في السنوات الأخيرة بشكل سريع حيث كان هذا الاستهلاك يشكل حوالي ٢٠ ٪ من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن عام ١٩٨٠م بينما وصل إلى حوالي ٢٩ ٪ من مجموع الاستهلاك عام ١٩٨٧م .

٧ - ٤ - ٣ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل :

تعد عملية ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل مهمة صعبة نوعاً ما إذ انها تتطلب إحداث بعض التغييرات في عادات وأذواق وطموحات قطاع كبير من أفراد المجتمع .

ومن الإجراءات الهامة التي يمكن لها أن تؤدي إلى توفير كبير في الطاقة في هذا القطاع ما يلي :

١ — على المدى القصير : (Short-term measures)

- (أ) استخدام السيارات ذات السعة الكبيرة .
- (ب) استخدام السرعات الاقتصادية لوسائل النقل المختلفة .
- (ج) استعمال السيارات الخصوصية الصغيرة والخفيفة .
- (د) التحول إلى استعمال وسائل النقل العام بدلاً من السيارات الخصوصية قدر الإمكان .
- (هـ) التخفيف من استعمال وسائل النقل الخاصة للأغراض غير الضرورية كالنزهات البعيدة والطويلة والزيارات الكثيرة .
- (و) استعمال وسائل تخفيف استهلاك الوقود في السيارات مثل بعض أنواع الإطارات ذات معامل الاحتكاك المنخفض .

٢ — على المدى المتوسط والمدى الطويل :

(Midterm & longterm measures)

- (أ) تنظيم مسارات وتقاطعات الطرق والاشارات الضوئية بحيث يؤدي هذا التنظيم إلى تسهيل حركة السير إلى أقصى حد ممكن وتقصير المسافات لوسائل النقل العامة بشكل خاص .

(ب) تطوير آلات ذات كفاءات أعلى .
(ج) تطوير أنظمة وشبكات النقل العام ومتابعة هذا التطوير بشكل مستمر .

(د) تغريم اقتناء السيارات الزائدة وتشجيع استعمال وسائط النقل العام ذات الكلفة الأقل .

(هـ) استعمال وسائط النقل العامة التي تستخدم مصادر الوقود الرخيصة كالديزل والفحم الحجري .

بالنسبة للأردن فإن قطاع النقل يستأثر بأعلى نسبة استهلاك للطاقة، إذ بلغت هذه النسبة ٤٨ ٪ عام ١٩٨٠م من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن وقد تراجعت هذه النسبة إلى حوالي ٣٩ ٪ عام ١٩٨٧م .



الفصل الثامن
التلوث البيئي الناتج
عن تحويل الطاقة

٨ - ١

تغيرات المناخ

يُسمى المناخ لمنطقة جغرافية صغيرة تتراوح مساحتها بين بضع مئات من الأمتار المربعة إلى بضع مئات الكيلومترات المربعة بمناخ المنطقة الصغيرة (المحدودة) أو المناخ المحلي (Micro climate) .

إن مثل هذه المنطقة تتأثر بالمناخ العام بالإضافة إلى تأثرها بشكل مباشر بعوامل محلية صرفة ليس لها علاقة بالمناخ العام وهذه العوامل هي التي سنركز عليها في هذه الدراسة .

٨ - ١ - ١ مناخ المدن

هناك اختلافات واضحة بين مناخ المدن ومناخ الريف ، وهذه الاختلافات معروفة منذ سنين عديدة ولكن أسبابها بدأت تتضح وتُفهم بشكل أوسع في الفترة الأخيرة . فالمدينة عبارة عن منطقة جغرافية ذات كثافة سكانية عالية، ويكون تركيز المخلفات أو النواتج الثانوية المصاحبة لنشاطات الإنسان المختلفة في هذه المنطقة أكبر منها في المناطق الريفية. ومن الأمثلة على هذه النشاطات المؤذية للبيئة بشكل كبير الإنتاج الثقيل والتكرير ومحطات الطاقة المركزية ... وكنتيجة لذلك فإن هواء المناطق الحضرية (Urban areas) يكون بشكل عام مُحَمَّلاً بالضباب والدخان والملوثات الغازية .

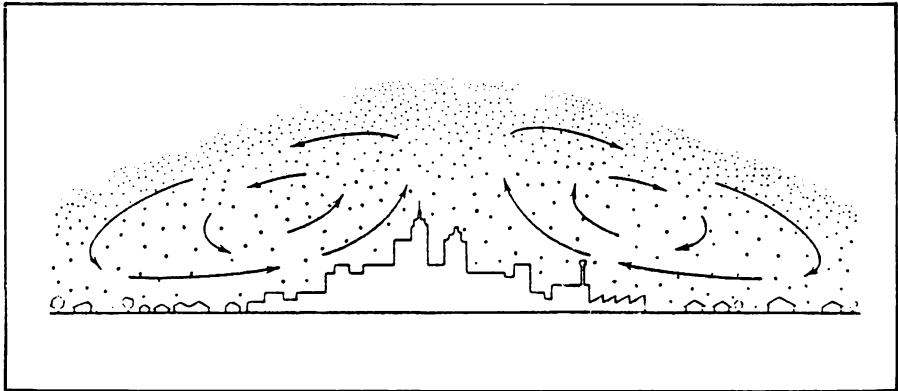
ولا يتوقف تأثير هذه الملوثات على زيادة تأثير البيت الزجاجي (الأخضر Green house effect) بل إنها تقوم بامتصاص الحرارة أيضاً، وهذا الامتصاص يعمل على تثبيت (Stable) الكتل الهوائية فوق هذه المدن مما يقلل من انتشار وتبعثر الملوثات في الجو ويساهم في زيادة تركيزها .

إن المدينة عبارة عن كتل مترابطة من الأبنية، ومواد هذه الأبنية من الحجارة والاسمنت المسلح التي تمتص الحرارة أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية والمناطق النباتية الخضراء، ولكنها توصل الحرارة أسرع منها بثلاث مرات ، لذا فإنها تخزن الطاقة الحرارية بكميات أكبر عند درجات حرارة أقل ، وفي الليل فإن هذه البنايات تشع الحرارة للجو أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية، ولهذا فإن جو المدن يكون عادة أكثر دفئاً من جو المناطق الريفية أو المناطق الزراعية الخضراء المحيطة بالمدينة . الشكل (٨ - ١) يبين جو المدينة المغلف بقبة من البخار الملوث (Dust dome) .

نتيجة للعوامل المحلية ، ليس هناك من حل شافٍ لمشكلة الجو الملوث في المدن ، إلا أنه بالإمكان التخفيف من حجم المشكلة بواسطة اتخاذ بعض التدابير مثل التقليل من الأجهزة المولدة للحرارة كالسيارات والمصانع وكثافة السكان ... وكذلك الحد من عدد البنايات العالية المتقاربة وزيادة المناطق النباتية الخضراء داخل المدن واستعمال مواد متعددة ومختلفة في البناء .

٨ - ١ - ٢ الأمطار الحامضية (Acid rain)

عند انطلاق أكاسيد النيتروجين والكبريت من محطات التوليد الكبيرة فإن هذه الأكاسيد تتحول بسرعة إلى سلفات ونترات (Sulfate & Nitrates) ومن ثم



الشكل (٨ - ١)
قبة الغبار الملوثة فوق المدينة

تتفاعل مع بخار الماء (الرطوبة) في الجو لتكون حامضي الكبريتيك والنيتريك (Sulfric & Nitric acids) التي تسقط على شكل مطر يعرف بالمطر الحامضي خصوصاً في المناطق المجاورة لمحطات حرق الفحم الكبيرة . وفي عام ١٩٥٠م لوحظ أن هذه الأمطار الحامضية تمتد إلى مناطق أخرى بعيدة عن مناطق التلوث الجوي كبعض المناطق الاسكندنافية (Scandinavia) حيث وجد من خلال بعض القياسات لهذه الأمطار بين عامي ١٩٥٧ — ١٩٧٠م في هذه المناطق أن نسبة الحموضة مرتفعة ، أي أن قيمة (P H) منخفضة. وتعرف القيمة (P H) بأنها سالب اللوغاريتم لتركيز ايون الهيدروجين معبراً عنه بوحدات مول / لتر (Mole per liter) وللماء المتعادل تكون قيمة (P H) تساوي سبعة (٧) وللأمطار الإعتيادية غير الملوثة تكون هذه النسبة حوالى ٥,٧ بسبب وجود ثاني أكسيد الكربون في الجو .

يُمثل التغير في قيمة (P H) من ٥ إلى ٤ زيادة في تركيز ايون الهيدروجين بمقدار عشرة (١٠) ، وأكثر الأمطار حموضة تلك التي هطلت في اسكتلندا عام ١٩٧٤م ، حيث وصلت قيمة (P H) لهذه الأمطار إلى ٢,٧ .

للأمطار الحامضية آثار ضارة على البيئة من أهمها :

- ١ — التقليل من غلة النباتات والغابات والحد من نموها .
- ٢ — التقليل من تكاثر الحياة البحرية والأسماك .
- ٣ — تآكل وإتلاف سطوح المعادن المكشوفة .
- ٤ — الحد من نشاطات الكائنات العضوية الدقيقة .
- ٥ — تلاشي المادة الغذائية من التربة والأنظمة البيئية المائية .

وقد لوحظ أن الأسماك قد اختفت من البحيرات التي تقل فيها قيمة (P H)

عن ٤,٦ .

٨ - ٢

تلوث الهواء

٨ - ٢ - ١ الملوثات الأولية للهواء الجوي : (Primary air pollutants)

إن المواد الأولية المصاحبة للهواء الملوث هي : أول أكسيد الكربون (C O) ، والهيدروكربونات (H C) ، وأكاسيد الكبريت (S O_x) وأكاسيد النيتروجين (N O_x) ، والدقائق (أهباب) الصلبة العالقة (Particulate matter) .

١ - أول أكسيد الكربون : (Carbon Monoxide C O)

لا يعتبر أول أكسيد الكربون مؤذياً للنباتات - بشكل خاص - إلا إذا تعرضت النباتات لهذا الغاز لفترة طويلة وبتركيز عالٍ . ولكنه مضر جداً وسام للإنسان والحيوان في حالة تنفسه، حيث أن قابلية الدم لامتصاص أول أكسيد الكربون أكبر بحوالى ٢١٠ مرات من قابليته لامتصاص الأكسجين مما يزيد من خطورته على الإنسان بشكل خاص .

٢ - الهيدروكربونات غير المحترقة : (H C)

وتشمل الهيدروكربونات مجموعة واسعة جداً من المواد الكيميائية (الوقود) لها تركيب جزيئي مكون فقط من الكربون والهيدروجين .

أكثر من نصف الهيدروكربونات الموجودة في الجو هي من الميثان (CH₄)، وهذه المجموعة لا تعتبر خطرة على الصحة عموماً ، ولكن المجموعة الأخرى من الهيدروكربونات - غير الميثان - مثل الألدهايدات (Aldehydes) ، والبنزين

(Benzene) ، والكيتون (Ketone) ، والإيثيلين (Ethylene) .. تمثل خطراً على الصحة كأثرها في إحداث تهيج الجلد (Skin irritation) والعين وخطر السرطان (Cancer) .

٣ - الدقائق الصلبة العالقة : (Suspended particulates)

كثير من هذه الدقائق التي تنبعث من محطات القوى الكبرى والعمليات الصناعية تعود للأرض كغبار متساقط . ودقائق الغبار الساقط هي تلك الدقائق التي لها أقطار أكبر من ١٠ ميكرومتر ($10 \mu m$) وخطر هذه الدقائق العالقة يعتمد على طبيعتها الكيميائية وتؤثر بشكل خاص على الرئتين والجهاز التنفسي للإنسان .

٤ - أكاسيد الكبريت : (Oxides of Sulfur)

تنبعث غازات ثاني أكسيد الكبريت ($S O_2$) وثلاثي أكسيد الكبريت ($S O_3$) من أنظمة حرق وقود المستحاثات بنسبة ١ / ٣٠ ويمكن لهذين الغازين التحول إلى أحماض الكبريتيك (Sulfuric acids) بوجود بخار الماء في الجو . ولغاز ثاني أكسيد الكبريت ($S O_2$) وحامض الكبريتيك تأثيرات خطيرة على الصحة تتمثل في تهيج وانقباض الشعبات القصبية في الرئتين .

٥ - أكاسيد النيتروجين : (Oxides of Nitrogen)

تنبعث غازات أكسيد النيتريك ($N O$) وثاني أكسيد النيتروجين ($N O_2$) مع عدة أكاسيد نيتروجينية أخرى من عمليات الاحتراق ذات درجات الحرارة المرتفعة .

يعتبر ثاني أكسيد النيتروجين ($N O_2$) ذو تأثير خطر جداً على الصحة ويمكن أن يكون له تأثير قاتل إذا زاد تركيزه عن حد معين .

كما أن كلا الغازين ($N O$) و ($N O_2$) يؤثران على الحياة النباتية ويؤديان إلى إبطاء معدل نموها بالإضافة إلى تأثيرهما الضار على بعض المواد مثل إتلاف ألياف القطن والنايلون وتغيير (إحداث تلاش) في لون الصبغات (Fading of dyes) .

كما أن التعرض لغاز ($N O_2$) لفترة طويلة بتركيز حوالى ($150 \mu g/m^3$) يؤدي إلى انقباض (تشنّج) وتورم الشعبات القصبية وازدياد احتمال حدوث

مرض مزمن للجهاز التنفسي. ويعدّ خطر أكاسيد النيتروجين في إنتاج وتكوين الملوثات الثانوية أكبر من خطرهما كملوثات أولية، وهذه الملوثات الثانوية عبارة عن مجموعة من المواد يطلق عليها اسم المؤكسدات (Oxidants) .

٨ - ٢ - ٢ تلوث الهواء الثانوي : (Secondary air pollution)

إن العديد من الملوثات الأولية تتفاعل مع بعضها ومع الشمس بتوافر ظروف جوية معينة لتكون ملوثات ثانوية ضارة وسيئة كالملوثات الأولية وأحياناً أسوأ منها وأشدّ ضرراً .

١ - تأثير انقلاب درجة الحرارة : (Temperature Inversion)

يبقى الهواء الملوث فوق المدن (الأماكن الحضرية) أحياناً لفترة طويلة في مكانه دون أن ينتشر أو يُخفف أو يبتعد عن المنطقة . وأحد الأسباب الأساسية لوضع كهذا ، ما يسمى بانقلاب درجة الحرارة (Temperature Inversion) .

تتناقص درجة حرارة الجو بانتظام مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض ويعطى معدل انحدار درجة الحرارة الأديابتيكي مع الارتفاع (Z) بالمعادلة :

$$\text{Adiabatic lapse rate} = - \frac{dT}{dZ} \quad (٨ - ١)$$

$$= \left(\frac{8-1}{8} \right) \left(\frac{g}{R} \right)$$

حيث :

٨ : الأس الأيزونتروبي للهواء ويساوي ١,٤١ للهواء الجاف .

M : الوزن الجزيئي للهواء ويساوي ٢٨,٩٧ للهواء الجاف .

وبتعويض هذه القيم بالمعادلة أعلاه نجد أن :

$$- \frac{dT}{dZ} = 0.0099 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{m} \quad (٨ - ٢)$$

أو ما يعادل

. 1 C° / 100 m

إن معدل الانحدار هذا ، له تأثير على ثبات حيز من الهواء (الملوث) فوق منطقة معينة، فإذا كان هذا المعدل أكبر من معدل الانحدار الأديابتيكي ، فإن هذا الحيز من الهواء سيكون محاطاً بهواء أبرد منه ومن ثم فإنه سيرتفع للأعلى ، وتسمى هذه الحالة بالجو غير المستقر، أو غير الثابت (Unstable-atmosphere) .

وهذا الوضع مرغوب به لأنه سيؤدي إلى ارتفاع الحيز الملوث من الهواء إلى الطبقات العليا من الجو واختلاطه مع حجوم أكبر من الهواء غير الملوث.

وفي حالة كون معدل الانحدار أقل من المعدل الأديابتيكي فإن حيز الهواء الملوث سيتجه للأسفل، ولا شك بأن هكذا وضع غير مرغوب فيه من وجهة نظر نشر الملوثات ، ومن الممكن أن يكون لمعدل الانحدار إشارة معكوسة (إشارة موجبة) ، أي ان درجة الحرارة تزداد بازدياد الارتفاع، وهذا الوضع يسمى بانقلاب درجة الحرارة وهو وضع سييء بالنسبة للتلوث لأنه يؤدي إلى ثبات واستقرار الحيز الملوث من الهواء وعدم حركته واختلاطه مع الهواء المحيط به (غير الملوث).

يحدث وضع انقلاب درجة الحرارة عادة في الليل حيث يبرد الهواء الملامس والقريب من سطح الأرض بسرعة أكبر من الهواء البعيد عن هذا السطح .

إن حدوث وضع انقلاب درجة الحرارة يؤدي إلى اتجاه الهواء الملوث للأسفل باتجاه الناس والبيوت ، وقد يؤدي ذلك إلى حالات وفاة إذا كان الهواء الملوث يحتوي على نسبة عالية من أكاسيد الكبريت .

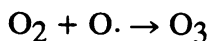
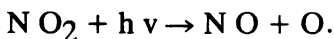
٢ — التفاعلات الضوئية الكيميائية : (Photochemical reactions)

إن الملوثات الثانوية التي تشكل الخطر الأكبر على الصحة في المناطق الحضرية والمزدحمة بالسكان هي نتيجة لتفاعلات كيميائية متتابعة ومعقدة وغير مفهومة بشكل كامل حتى وقتنا الحاضر، وجميع هذه التفاعلات تنطلق بتأثير الأشعة الشمسية .

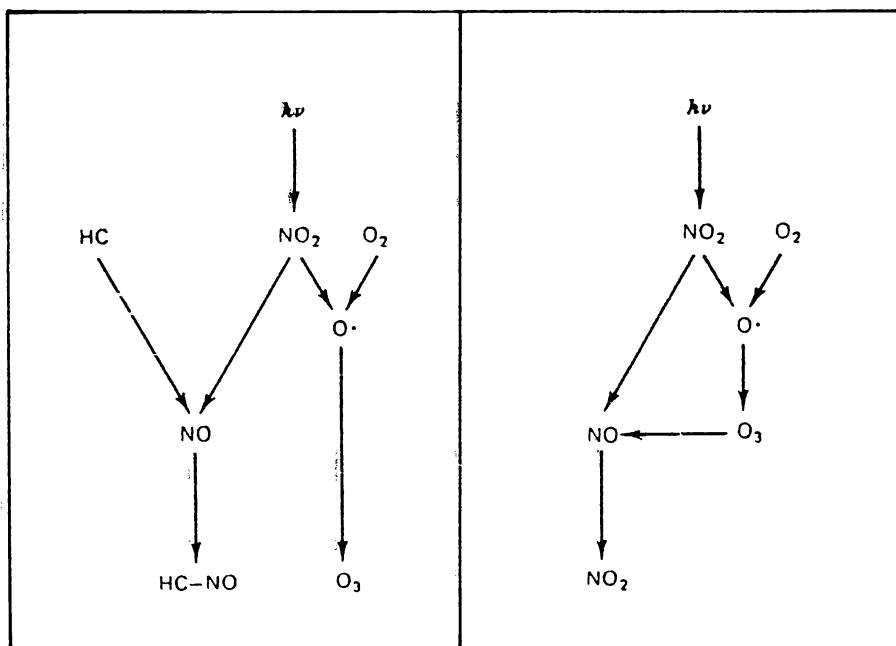
هناك مُقَوِّمان مهمان لهذه التفاعلات هما الأوزون (Ozone) والعديد من الهيدروكربونات الأخرى غير الميثان ، وبمجموعها تسمى المؤكسدات — المؤكسد أي مادة يمكن لها أن تسبب حدوث تفاعل التأكسد —.

هناك العديد من المؤكسدات الهيدروكربونية ، وبما أن الأوزون يكون دائماً واحداً من المؤكسدات فإنه من الطبيعي ان يعبر عن مستويات (تركيز) هذه المؤكسدات بتحديد مستوى الأوزون .

يتم إنتاج الأوزون (O_3) في طبقات الجو السفلى بواسطة تفاعل جزيئات الأكسجين مع ذرات الأكسجين المُحرَّرة من تفاعل ضوء الشمس مع ثاني أكسيد النيتروجين كالآتي :



وإذا لم يكن هناك ملوثات أخرى في الجو، فإن التفاعلات أعلاه يتم إبطالها (Negated) بواسطة إعادة الاتحاد بين الأوزون (O_3) وأكسيد النيتريك (NO) كما هو مبين في الشكل (٨ - ٢) .



الشكل (٨ - ٣)

إنتاج مركبات نيتروجينية عضوية
بواسطة اشعة الشمس

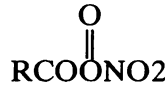
الشكل (٨ - ٢)

تسخين خفيف للجو بواسطة (NO_2)

وتكون الحصلة النهائية للعملية مجرد تسخين بسيط للجو بواسطة امتصاص الفوتونات الضوئية، ولكن بوجود الهيدروكربونات كما هو مبين في الشكل (٨ - ٣) فإن الأوزون المنتج في الخطوة الأولى يبقى على حاله ويتكون مركب نيتروجيني عضوي (H C-N O) .

ويمكن إنتاج المزيد من الأوزون عن طريق اختزال مركبات لها الصيغة (H C O) بواسطة مركب (N O) والذي ينتج أيضاً مركب (N O₂) .

إن العديد من النترات العضوية (Organic Nitrates) في الجو الملوث تعتبر مؤكسدات قوية جداً وهذه المؤكسدات لها الصيغة التركيبية :



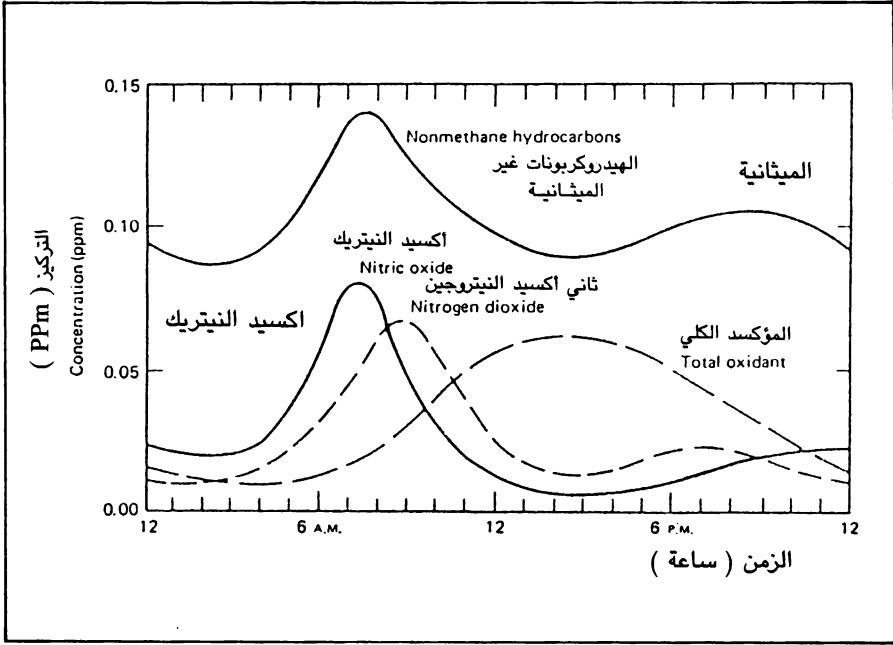
حيث ان (R) هي أحد الجذور الالكانية (Alkane roots) ولكن على الأغلب فإن (R = C H₃) . وتعتبر هذه المؤكسدات ذات تأثير مؤذ حيث انها تتلف الأنسجة الجسدية للإنسان وتدمر الحياة النباتية . إن إنتاج هذه المؤكسدات الضارة يرتبط ارتباطاً وثيقاً بإنتاج الملوثات الأولية من أكاسيد النيتروجين (N O_x) .

الشكل (٨ - ٤) يبين تنامي كل من (N O) و (N O₂) والهيدروكربونات غير الميثانية (Non - methane hydrocarbons) والمؤكسد مع الزمن (الوقت من اليوم) في جو منطقة حضرية مكتظة بالسكان ووسائل النقل والمصانع ومحطات القوى ...

وكما نلاحظ من الشكل فإن القيم (N O) و (N O₂) العظمى ترتبط بساعات الازدحام الصباحية والمسائية. ويبين الشكل أيضاً أن تكون المؤكسد يبدأ مباشرة بعد طلوع الشمس ويصل إلى ذروته عند الظهر، ثم يبدأ بالتناقص بعد ذلك طالما أن هناك ضوءاً نهائياً كافياً .

٨ - ٢ - ٣ التلوث داخل البيوت : (Indoor pollution)

هناك أربع ملوثات رئيسة داخل البيوت ، هي غاز الرادون (Radon) وأول أكسيد الكربون (C O) والدقائق العالقة كالغبار والمواد العضوية . يعتبر



الشكل (٨ - ٤)
العلاقة بين تركيز الغازات الملوثة والزمن
في جو منطقة حضرية ($1 \text{ PPm} = 1.15 \text{ mg} / \text{m}^3$)

غاز الرادون (Rn^{222}) غازاً خاملاً ينتج من الاضمحلال الإشعاعي لعنصر اليورانيوم ، أما الرادون كعنصر مشع (Radio active) فيكون باعثاً لجسيمات ألفا (α -emitter) ، وهذا النظير له فترة نصف عمر تساوي ٣,٨ يوماً فقط .

ولكن نواتج اضمحلاله هي أيضاً مواد مشعة وتبعث جسيمات ألفا (α) . وتقوم هذه المواد المشعة بالالتصاق بالدقائق العالقة والغبار وغيرها الموجودة في جو المنزل والتي يمكن أن يستنشقتها سكان المنزل. ويعد الإشعاع المستنشق أكثر خطراً على الصحة من الإشعاع الخارجي . ولا يعتبر الرادون مشكلة كبيرة في البيوت التي يشكل الطوب (Brick) أو الاسمنت (Concrete) جزءاً كبيراً من بنائها ، ولكنه في حالة وجود الكثير من بناء الاسمنت أو الطوب مع عدم توافر التهوية الكافية فإن مستوى الإشعاع يزداد في هذه البيوت عن المستوى العادي بثلاث مرات بفعل اضمحلال اليورانيوم الموجود في مواد البناء هذه .

أما أول أكسيد الكربون فإنه يتكون أساساً كنتيجة لحرق أخشاب الوقود في المنزل — لأغراض التدفئة والاستعمالات الأخرى — وكذلك من المدافئ خصوصاً في حالة عدم وجود تهوية كافية .

الدقائق العالقة هي ألياف أسبستية (Asbestos fibers) بشكل أساسي . ويستعمل الأسبست كثيراً في البيوت والمدارس كمادة عازلة ، كذلك في البناء . ولقد تم التعرف منذ سنوات إلى أخطار عديدة لها علاقة بالأسبست كالأضرار التنفسية وسرطان الرئة .

بالنسبة للمواد العضوية فإن هناك العديد منها ذات علاقة بموضوع التلوث داخل المنازل وأكثرها خطراً هو الفورمالدهايد (Formaldehyde) الذي يؤدي إلى تدميع العيون (Watery eyes) وتهيج الأنف والحلق والرئة عند تركيز يقل عن (1 PPm) حيث ان ($1 \text{ PPm} = 1.15 \text{ mg} / \text{m}^3$) .

٨ - ٣

التحكم في تلوث الهواء وضبطه (Air pollution control)

٨ - ٣ - ١ التحكم في الدقائق الصلبة العالقة :

إن مصادر التلوث الرئيسة هي مختلف أنواع المركبات ومحطات حرق الفحم الحجري . والملوثات الرئيسة التي يمكن إزالتها أو التخلص منها بشكل فعال هي الدقائق العالقة وغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) .

هناك عدة طرق مستعملة للتخلص من الدقائق العالقة الموجودة في الغازات العادمة التي تنفثها المحطات والمصانع، ويقاس أداء أي نظام إزالة بواسطة ما يسمى كفاءة التجميع (Collection efficiency) لهذا النظام والتي تُعرّف كالآتي :

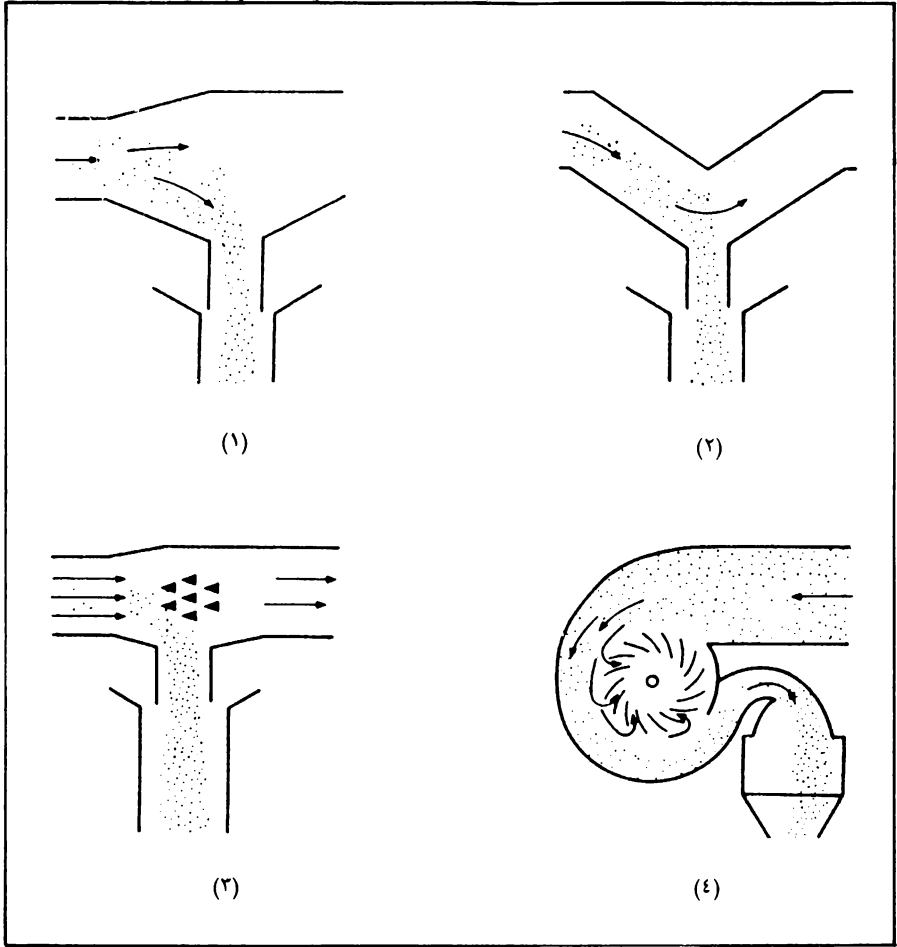
$$C E = \frac{\text{كتلة الغبار المزال}}{\text{كتلة الغبار الموجود}} \quad (٨ - ٣)$$

كفاءة التجميع

وتتراوح قيمة هذه الكفاءة من ٥٠ ٪ لبعض الأنظمة الميكانيكية البسيطة إلى ٩٩ ٪ للمرسب الكهروساكن (Electrostatic precipitator) . الشكل (٨ - ٥) يبين بعض الأنظمة الميكانيكية النموذجية المستعملة في إزالة الدقائق العالقة وهي :

١ - التقليل الفجائي من سرعة الغاز .

٢ - التغيير المفاجيء في اتجاه جريان الغاز .

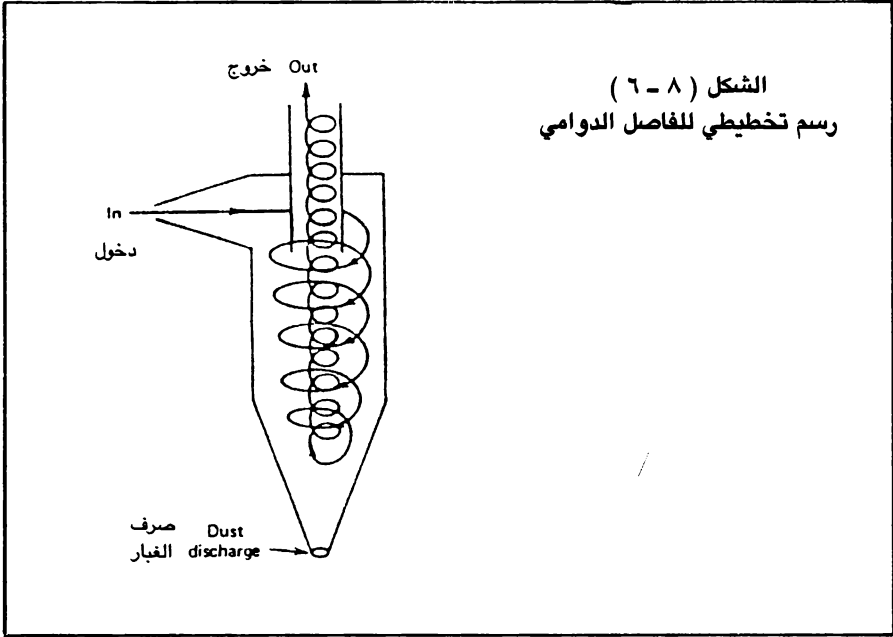


الشكل (٨ - ٥)
بعض أنظمة ترسيب الغبار الميكانيكية

٣ - اصطدام تيار الغاز بعدد من المصدّات .

٤ - استعمال قوة الطرد المركزي، كما هو الحال في مروحة ريشة الرماد (Cinder-Vane fan) .

تسمى الأنظمة الثلاثة الأولى في الشكل (٨ - ٥) بمصائد الرماد

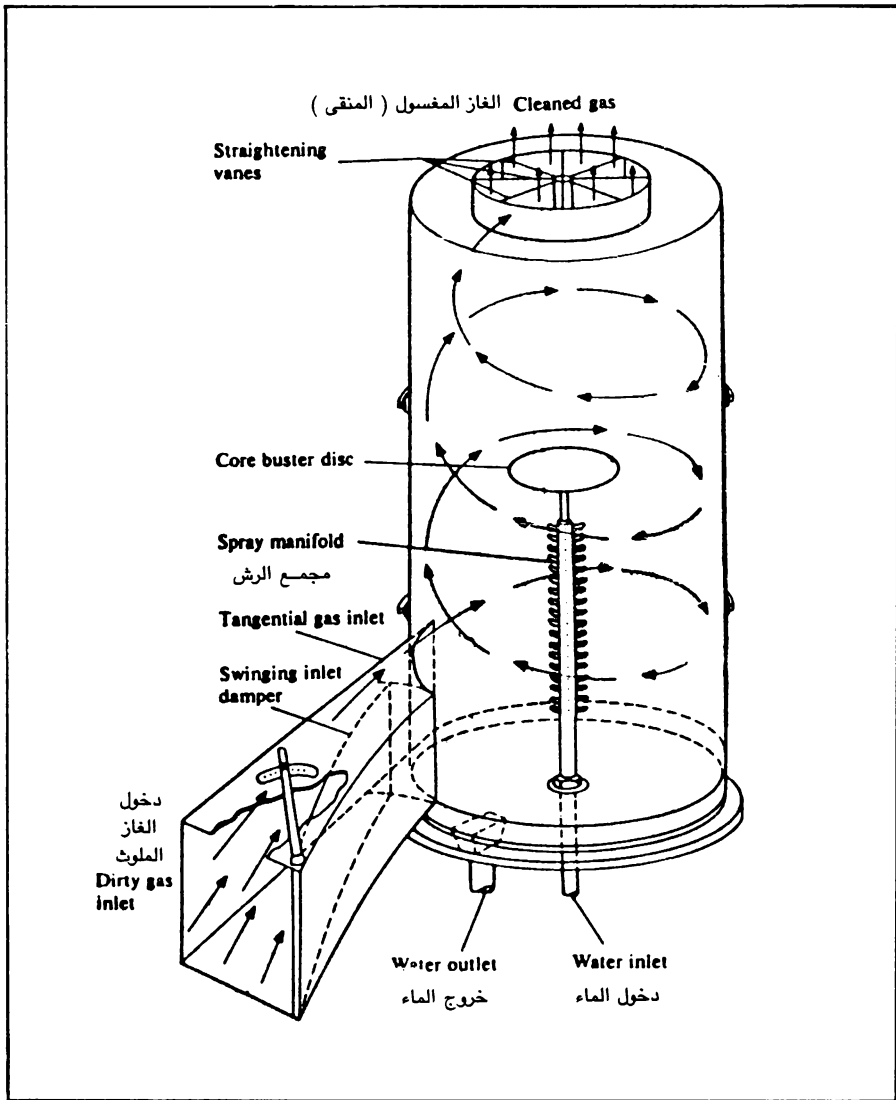


(Cinder Catchers) وتستعمل عادة في فرن ستوكر (Stoker) والأفران الدوامية الصغيرة التي يُحرق فيها الفحم المهشم عوضاً عن الفحم المسحوق فائق النعومة، وتتراوح كفاءات مصائد الرماد ومروحة ريشة الرماد المبينة في الشكل (٨ - ٥) ما بين ٥٠ - ٧٥ ٪ .

وتستخدم الفاصلات الدوامية (Cydone Separators) — كالمبينة في الشكل (٨ - ٦) — للحصول على كفاءات تجميعية أعلى منها في حالة مصائد الرماد حيث تصل كفاءة الفاصل الدوامي إلى حوالي ٨٥ ٪ .

ويتلخص مبدأ عمل الفاصل الدوامي بتجميع الدقائق العالقة (الغبار) على جدران حجرة الفاضل بواسطة قوة الطرد المركزي ومن ثم ينهار هذا الرماد باتجاه قاع حجرة الفاصل حيث يتم تجميعه والتخلص منه . وتمتاز الفاصلات الدوامية بسهولة صيانتها وانخفاض تكاليف تشغيلها .

ويستخدم جهاز غسل الغاز — كالمبين في الشكل (٨ - ٧) — لإزالة الدقائق العالقة من الغازات المتولدة في العمليات الكيميائية المختلفة وفي صناعة طحن الحبوب ، ولا يستخدم — في العادة — لإزالة الرماد من الغازات العادمة .



الشكل (٨ - ٧)
جهاز غسل الغاز

وبعض مشاكل هذا الجهاز هي أن الغاز يبرد كثيراً خلال عملية الغسل مما يتطلب إعادة تسخينه قبل إعادته للمدخنة، ومشكلة انخفاض ضغط الغاز خلال مروره بالجهاز بالإضافة إلى مشكلة تلوث الماء بحامضي الكبريتوز (Sulfurous acid)

والكبريتيك (Sulfuric acid) — والتي تسبب مشاكل التآكل — إذا كان الغاز يحتوي على أكاسيد الكبريت . وتبلغ كفاءة التجميع (الغسل) لهذا الجهاز حوالى ٩٠ ٪ .

وهناك المرسب الكهروساكن (Electrostatic precipitator) المستعمل لإزالة الدقائق العالقة (الغاز) من الغازات العادمة، كما هو مبين في الشكل أدناه .

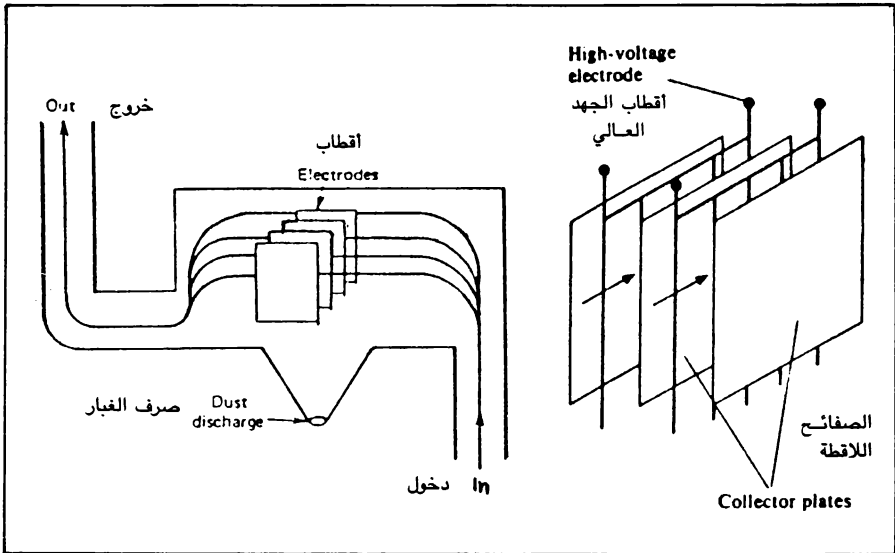
في هذا المرسب ، توضع أسلاك ذات شحنات عالية جداً — ٣٠٠٠٠ — ٦٠٠٠٠ فولت — في مجرى الغاز الملوّث بين صفيحتين مؤرضتين (Grounded plates) حيث تُشحن الدقائق بشحنة سالبة خلال مرورها عبر الأسلاك ومن ثم تنجذب باتجاه الصفائح المؤرضة التي يتم إزالة الدقائق المترسبة عليها بواسطة طرّقتها بقطعة من الفولاذ التي يتم رفعها وإسقاطها بواسطة مغناطيس كهربائي بين حين وآخر ، ويتم جمع الغبار المترسب بواسطة أحواض خاصة موضوعة تحت الصفائح .

ويجب أخذ الحيطة عند تشغيل هذا المرسب من احتمال دخول شحنات من الغازات غير المحترقة إليه ، وفي حالة دخولها يجب إيقاف المرسب فوراً عن العمل (قطع التيار الكهربائي عنه) لأنها تسبب حدوث شرارات كهربائية بين الأسلاك والصفائح قد تؤدي إلى حدوث انفجار في المرسب . الشكل (٨ - ٨) يبين رسماً تخطيطياً للمرسب الكهروساكن .

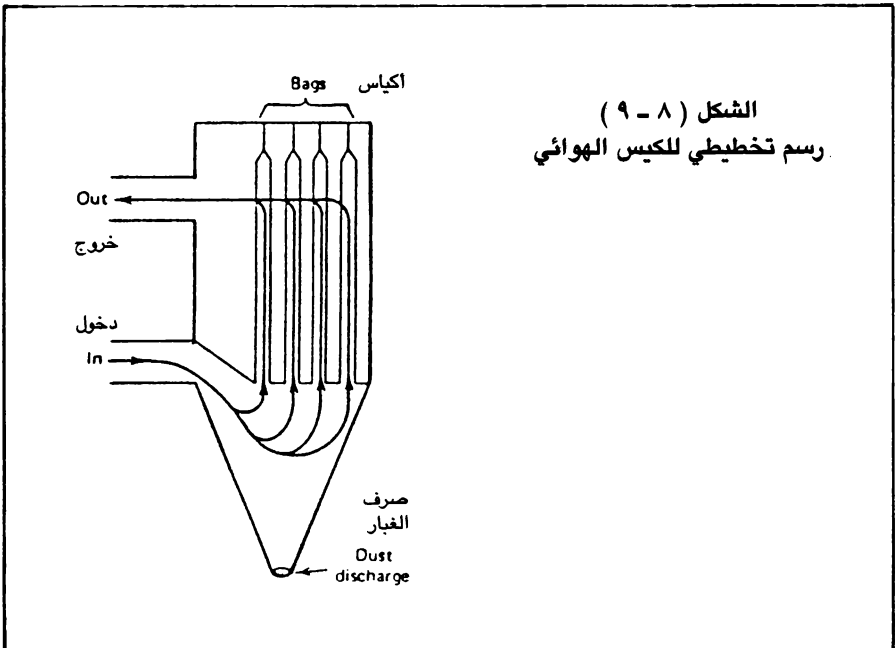
في حين أن المرسب الكهروستاتيكي شائع الاستعمال في محطات التوليد وله كفاءة تجميع تصل إلى ٩٩ ٪، إلا أنه لا يعمل بشكل جيد عند وجود رماد متطاير ذي مقاومة كهربائية مرتفعة كما هو الحال في الرماد المتطاير عند حرق الفحم الحجري ذي المحتوى المنخفض من الكبريت . وإحدى الطرق المستخدمة لحل هذه المشكلة هي بإضافة غاز ثالث أكسيد الكبريت (SO_3) إلى الغازات العادمة لزيادة الموصلية الحرارية للرماد المتطاير .

ومن الطرق المستخدمة في إزالة الدقائق العالقة طريقة الترشيح باستعمال الأكياس الهوائية (Air - bag) — كالمبين في الشكل (٨ - ٩) .

وتستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في مصانع الاسمنت ومصانع المنتجات الصيدلانية . ويتم تنظيف الأكياس الهوائية بواسطة تمرير الهواء باتجاه



الشكل (٨ - ٨)
رسم تخطيطي للمرسب الكهروساكن



الشكل (٩ - ٨)
رسم تخطيطي للكيس الهوائي

معاكس عبر هذه الأكياس أو بواسطة طرقها أو هزها بطرق أتوماتيكية . وتعتبر الأكياس الهوائية من الأنظمة ذات الكفاءة العالية لغاية استخلاص دقائق ذات أقطار صغيرة تصل إلى ٠,٣ ميكرومتر . ومن سيئات هذه الأكياس أنها ذات تكاليف صيانة وتشغيل مرتفعة .

٨ - ٣ - ٢ التحكم في الملوثات الغازية :

تعتبر أكاسيد الكبريت (SO_x) — خصوصاً ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) — من الملوثات الأساسية للجو . وتتولد معظم هذه الأكاسيد من محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بوقود المستحاثات . إحدى الطرق المستخدمة لتخفيف نسبة هذه الملوثات في الجو هي بحرق الوقود ذي المحتوى الكبريتي المنخفض خصوصاً الفحم الحجري الذي يحتوي على أكبر النسب من الكبريت . وفي بعض الحالات فإنه بالإمكان إزالة الكبريت من الوقود قبل حرقه كما هو الحال في حرق الوقود الزيتي (Fuel-oil) . ولكون عملية إزالة الكبريت (Desulfurization) عملية مكلفة فإنها تستخدم على نطاق ضيق .

هناك طريقتان أساسيتان للتخلص من غاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) :

١ — أنظمة الاسترجاع أو التجديد (Recovery or regenerative)

(systems) في هذه الأنظمة ، فإن المادة المتفاعلة المستخدمة في امتصاص ثاني أكسيد الكبريت من الغازات الملوثة يتم استرجاعها لإعادة استخدامها ويكون الناتج النهائي للعملية إما حامض الكبريتيك (H_2SO_4) أو عنصر الكبريت (S) .

٢ — الأنظمة غير المجددة (Non generative system) في هذه الأنظمة

لا يتم استرجاع المواد المتفاعلة وتكون النواتج النهائية للعملية هي أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم الكبريتية مثل ($CaSO_3$) و ($CaSO_4$) و ($MgSO_3$) و ($MgSO_4$) .

ترتبط عملية إنتاج أكاسيد النيتروجين الملوثة (NO_x) ارتباطاً وثيقاً بدرجة حرارة الاحتراق وتزداد بازديادها ولهذا فإن واحدة من الطرق الأساسية للتقليل من هذه الملوثات هي بواسطة تخفيض درجة حرارة الاحتراق ومنع حدوث النقاط الحارة (Hot-Spots) في الأفران ، كما يمكن الحد من تكون أكاسيد النيتروجين بتخفيض نسبة الهواء / الوقود أو بإعادة التدوير للغازات العادمة (Exhaust-gas recirculation) .

التلوث الحراري : (Thermal pollution)

إحدى مشاكل التلوث المصاحبة لتوليد الكهرباء في المحطات هي مشكلة تلوث الماء . وهناك ثلاث حالات لتلوث الماء في محطات توليد الطاقة :

- ١ - التلوث الكيميائي .
- ٢ - التلوث من المواد الصلبة .
- ٣ - التلوث الحراري .

وسنركز هنا على النوع الثالث من هذا التلوث المصاحب لطرد كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى البيئة المجاورة للمحطة - خصوصاً الماء - ، حيث أن ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للمياه الطبيعية المجاورة للمحطة يؤدي إلى حدوث ما يسمى بالتلوث الحراري .

إن إضافة الحرارة للماء يقلل من قدرته على حمل الغازات الذائبة فيه ومن ضمنها الأكسجين الذائب في الماء الذي يعتبر حيويًا وهاماً جداً للحياة المائية ، فإذا زادت درجة حرارة الماء عن ٣٥°س فإن كمية الأكسجين الذائبة في الماء تصبح غير كافية للكائنات التي تعيش في هذه المياه، وعلى العكس من ذلك فإن الارتفاع المعقول في درجة حرارة المياه يعزز الحياة المائية ويساهم في نمو النباتات والأسماك بسرعة أكبر .

إن كمية الحرارة المطرودة من المحطة الحرارية إلى المياه - المياه المستعملة في التبريد - يعتمد على كفاءة هذه المحطة ، فإذا فرضنا أن الكفاءة

الحرارية لهذه المحطة هي ٤٠ ٪ فإن كمية الحرارة التي يتم ضخها للمياه تساوي ٦٠ ٪ من مجموع الطاقة المتولدة من حرق الوقود، أي أن الحرارة التي تساهم في التلوث الحراري تساوي ١,٥ مرة الحرارة التي يستفاد منها في توليد الطاقة المفيدة (الكهربائية) .

التلوث الناتج عن النفايات الصلبة : (Solid-Waste pollution)

إن المحطات التي تستخدم الفحم الحجري كوقود تنتج كميات كبيرة من النفايات الصلبة على شكل رماد . فمحطة حرارية قدرتها ٥٠٠ ميغاواط من الكهرباء - وتعمل بالفحم الحجري نسبة الرماد فيه ١٠ ٪ - تنتج كمية من الرماد مقدارها ٢٠ طناً كل ساعة أو ما يعادل ١٦٥٠٠٠ طن من الرماد سنوياً . بعض الرماد يمكن إضافته للتربة ، أما الرماد المتطاير (Flaysh) فهو حامضي ويمكن استخدامه في تصنيع الاسمنت والطوب .

وإذا كانت نفس المحطة تستخدم الحجر الكلسي للتخلص من غاز ثاني أكسيد الكبريت فإن ذلك يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم ، فإذا كانت نسبة الكبريت في الفحم هي ٢,٧٢ ٪ فإن كمية ملح الكالسيوم المنتجة تساوي ١٥ ٪ طن في الساعة أو ما يعادل ١٢٠٠٠٠ طن في السنة بفرض أن ٢ ٪ من الكبريت يتحول إلى ملح الكالسيوم .

إن أخطر أنواع التلوث من المواد الصلبة هو التلوث الناتج عن مخلفات المفاعلات النووية الانشطارية حيث أن هذه المخلفات ذات نشاط إشعاعي عالٍ ، وبسبب هذه الكميات الكبيرة من الإشعاع المنبعثة من هذه النفايات النووية فإنه من الضروري جداً عزل هذه المخلفات عن المحيط الحيوي (Biosphere) لمدة لا تقل عن ألف (١٠٠٠) عام حتى يصبح نشاطها الإشعاعي مساوياً للنشاط الإشعاعي لليورانيوم الخام .

وهناك عدة مقترحات أو مشاريع للتخلص من النفايات النووية ، من هذه

المشاريع تثبيت هذه النفايات في زجاج سيلكات البورون (Borosilicate glass)
ومن ثم تخزين هذا الزجاج في كبسولات محكمة الإغلاق وتخزين هذه الكبسولات
بعد ذلك في مناجم أملاح عميقة أو آبار محفورة في أرضية المحيط المستقرة
(Stable ocean floor) .

● ● ●

ملحق رقم (١)

زاوية الارتفاع (β_1) وزاوية السم (α_1) وشدة الإشعاع الشمسي الكلي عند أوقات مختلفة من اليوم وعلى مدار أشهر السنة ، عند خط عرض ٤٠ شمالاً

(For 40 degrees North latitude; 1.0 clearness factor; 0% ground reflectance)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m ² †		
	A.M.	P.M.	Altitude β_1	Azimuth α_1	Direct normal	Horizontal	South vertical
Jan 21	8	4	8.1	55.3	448	88	265
	9	3	16.8	44.0	753	262	539
	10	2	23.8	30.9	864	400	703
	11	1	28.4	16.0	911	485	797
	12		30.0	0.0	927	517	829
	Surface daily totals, W·h/m ²				6878	2988	5440
Feb 21	7	5	4.8	72.7	217	32	69
	8	4	15.4	62.2	706	230	337
	9	3	25.0	50.2	863	416	526
	10	2	32.8	35.9	930	561	662
	11	1	38.1	18.9	961	649	744
	12		40.0	0.0	971	681	772
	Surface daily totals, W·h/m ²				8321	4457	5453
Mar 21	7	5	11.4	80.2	539	145	110
	8	4	22.5	69.6	788	359	281
	9	3	32.8	57.3	889	545	435
	10	2	41.6	41.9	936	687	555
	11	1	47.7	22.6	961	779	630
	12		50.0	0.0	968	810	656
	Surface daily totals, W·h/m ²				9191	5838	4678

[يتبع] † 1 W/m² = 0.3173 Btu/h ft².

(Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m ² †		
	A.M.	P.M.	Altitude β_1	Azimuth α_1	Direct normal	Horizontal	South vertical
Apr 21	6	6	7.4	98.9	281	63	13
	7	5	18.9	89.5	649	274	38
	8	4	30.3	79.3	794	479	167
	9	3	41.3	67.2	864	652	293
	10	2	51.2	51.4	901	788	397
	11	1	58.7	29.3	920	873	463
	12		61.6	0.0	924	905	485
	Surface daily totals, W·h/m ²				9746	7168	3221
May 21	5	7	1.9	114.7	3	0	0
	6	6	12.7	105.6	454	154	28
	7	5	24.0	96.6	681	359	41
	8	4	35.4	87.2	788	552	79
	9	3	46.8	76.0	842	716	189
	10	2	57.5	60.9	873	842	280
	11	1	66.2	37.1	892	924	340
	12		70.0	0.0	895	949	359
	Surface daily totals, W·h/m ²				9960	8044	2282
June 21	5	7	4.2	117.3	69	13	3
	6	6	14.8	108.4	489	189	32
	7	5	26.0	99.7	681	388	44
	8	4	37.4	90.7	775	574	50
	9	3	48.8	80.2	829	734	148
	10	2	59.8	65.8	857	857	233
	11	1	69.2	41.9	873	933	290
	12		73.5	0.0	879	958	309
	Surface daily totals, W·h/m ²				10,023	8346	1923
July 21	5	7	2.3	115.2	6	0	0
	6	6	13.1	106.1	435	158	28
	7	5	24.3	97.2	656	359	44
	8	4	35.8	87.8	760	548	76
	9	3	47.2	76.7	816	709	183
	10	2	57.9	61.7	848	835	271
	11	1	66.7	37.9	867	914	328
	12		70.6	0.0	870	939	350
	Surface daily totals, W·h/m ²				9651	7987	2213

[يتبع] † 1 W/m² = 0.3173 Btu/h·ft².

(Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m ² †		
	A.M.	P.M.	Altitude β_1	Azimuth α_1	Direct normal	Horizontal	South vertical
Aug 21	6	6	7.9	99.5	255	66	16
	7	5	19.3	90.0	602	274	38
	8	4	30.7	79.9	747	473	158
	9	3	41.8	67.9	820	646	281
	10	2	51.7	52.1	857	775	378
	11	1	59.3	29.7	876	860	441
	12		62.3	0.0	883	889	463
Surface daily totals, W·h/m ²					9191	7073	3063
Sep 21	7	5	11.4	80.2	469	136	101
	8	4	22.5	69.6	725	344	265
	9	3	32.8	57.3	829	526	416
	10	2	41.6	41.9	883	665	530
	11	1	47.7	22.6	905	753	605
	12		50.0	0.0	914	785	630
Surface daily totals, W·h/m ²					8536	5636	4463
Oct 21	7	5	4.5	72.3	151	22	50
	8	4	15.0	61.9	643	214	315
	9	3	24.5	49.8	810	397	504
	10	2	32.4	35.6	882	536	640
	11	1	37.6	18.7	917	627	722
	12		39.5	0.0	927	656	750
Surface daily totals, W·h/m ²					7735	4249	5213
Nov 21	8	4	8.2	55.4	429	88	255
	9	3	17.0	44.1	731	258	526
	10	2	24.0	31.0	845	397	690
	11	1	28.6	16.1	892	482	782
	12		30.2	0.0	908	514	813
Surface daily totals, W·h/m ²					6707	2969	5314
Dec 21	8	4	5.5	53.0	281	44	177
	9	3	14.0	41.9	684	205	514
	10	2	20.7	29.4	823	337	697
	11	1	25.0	15.2	883	422	794
	12		26.6	0.0	898	451	829
Surface daily totals, W·h/m ²					6235	2465	5188

● ● ●

ملحق رقم (٢)

المرکبة العمودية المباشرة (I d n)
عند اوقات مختلفة وخطوط عرض مختلفة

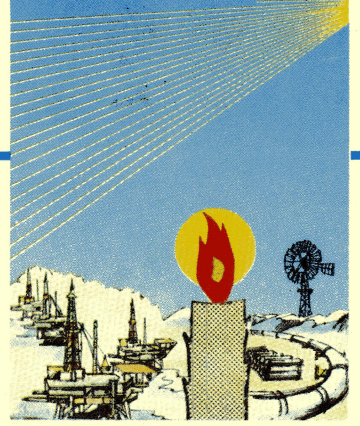
Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m ²	Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m ²
Jan 21	24	8718	Apr 21	24	9569
$\delta = -20^\circ$	32	7748	$\delta = +11.9^\circ$	32	9696
	40	6878		40	9746
	48	5390		48	9696
	56	3549		56	9532
	64	965		64	9399
Feb 21	24	9569	May 21	24	9557
$\delta = -10.6^\circ$	32	9053	$\delta = +20.3^\circ$	32	9809
	40	8321		40	9960
	48	7344		48	10257
	56	6260		56	10528
	64	4514		64	10937
Mar 21	24	9702	June 21	24	9437
$\delta = 0.0^\circ$	32	9494	$\delta = +23.45^\circ$	32	9721
	40	9191		40	10023
	48	8763		48	10439
	56	8151		56	10837
	64	7237		64	11505
July 21	24	9242	Oct 21	24	9040
$\delta = +20.5^\circ$	32	9494	$\delta = -10.7^\circ$	32	8498
	40	9651		40	7735
	48	9954		48	6789
	56	10212		56	5686
[يتبع]	64	10628		64	3902

Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m ²	Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m ²
Aug 21	24	9027	Nov 21	24	8529
$\delta = +12.1^\circ$	32	9147	$\delta = -19.9^\circ$	32	7584
	40	9191		40	6707
	48	9134		48	5257
	56	8983		56	3448
	64	8851		64	952
Sep 21	24	9071	Dec 21	24	8271
$\delta = 0.0^\circ$	32	8851	$\delta = -23.45^\circ$	32	7401
	40	8536		40	6235
	48	8094		48	4551
	56	7464		56	2357
	64	6537		64	76

● ● ●

عاهد الخطيب

مبادئ تحويل الطاقة



التوزيع : المركز العربي لتوزيع المطبوعات
بيروت - لبنان

الناشر : دار الشروق للنشر والتوزيع
عمان - الأردن